

TIRS DE LANCEURS SPATIAUX ET ESPACES NATURELS EN GUYANE

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES LANCEMENTS



Enseignante :
Mme. VERNEUIL C.

SOMMAIRE

Introduction

Glossaire

I – Le Centre Spatial Guyanais – CSG

- I.1 – Historique
- I.2 – Missions
- I.3 – Infrastructures
- I.4 – Environnement

II – Les Lanceurs

- II.1 - Historique – Dates marquantes
 - A - Types de lanceurs
 - B - Caractéristiques techniques basiques

III – Ariane 5 ESC-A : Fonctionnement – Produits – Environnement

- III.1 – Caractéristiques techniques d’Ariane 5 ESC-A
- III.2 – Chronologie d’un lancement
- III.3 – Lancement en situation normale
- III.4 – Lancement en situation accidentelle
- III.5 – Etude toxicologique des produits
 - A – Oxyde d’aluminium
 - B – Diazote
 - C – Eau
 - D – Dioxygène
 - E – Chlorure d’hydrogène
 - F – Dioxyde de carbone
 - G – Perchlorate d’ammonium
 - H – Polybutadiène
 - I – Aluminium
 - J – Hydrazine
- III.6 – Lancement en situation normale
 - A – Bilan toxicologiques des rejets
 - B – Impacts directs sur l’environnement
- III.7 – Lancement en situation accidentelle
 - A – Bilan toxicologiques des rejets
 - B – Impacts directs sur l’environnement
- III.8 – Mesures et moyens de prévention – protection
 - A – Cadre réglementaire
 - B – Mesures réalisées à chaque lancement

IV – Etude de cas : Vol VA238 – Principe – Effets – Impacts

IV.A – Présentation et résumé

IV.B – Prévisions, mesures et suivis réalisées

Conclusion

Bibliographie

INTRODUCTION

Depuis la guerre froide, la conquête spatiale n'a cessé d'évoluer, permettant l'apparition des technologies actuelles. Ces dernières sont particulièrement diverses et variées et il existe aujourd'hui différents types de lanceurs spatiaux permettant de mettre en orbite du matériel (satellites, parties de stations spatiales, etc). Bien évidemment, ces lancements sont effectués à partir de pas de tir, installés dans des bases spatiales comme le cosmodrome de Baïkonour au Kazakhstan ou à Kourou en Guyane.

Le tir de ces lanceurs orbitaux est rendu possible grâce à des technologies utilisant des produits très puissants. Au vu de la puissance nécessaire au décollage et à la mise en orbite de matériels spatiaux, on peut se demander dans quelle mesure ces produits et leur participation au tir d'un lanceur peuvent avoir un impact sur leur environnement proche, voire lointain. Dans cet article, nous expliquerons le principe de fonctionnement d'un lanceur en particulier : Ariane 5. Nous essaierons de déterminer si ce lanceur peut avoir des impacts environnementaux et si tel est le cas, comment est-il possible de les limiter ou de les surveiller. Nous prendrons en exemple, le vol VA 238.

I - LE CENTRE SPATIAL GUYANAIS – CSG

I.1 - Historique

En 1962, l'Algérie obtient son indépendance et quelques années plus tard, le Centre Nationale d'Etudes Spatiales (CNES) est contraint de quitter le site de lancement spatial d'Hamaguir. Dans son rapport d'étude concernant l'installation sur un autre site de lancement, le CNES penche en faveur de Kourou en Guyane. En effet, ce site présente de nombreux avantages majeurs :

- Densité de population faible (risques réduits en cas de problème avec les lanceurs)
- Proximité de l'Océan Atlantique (risques réduits en cas de problème avec les lanceurs)
- Proximité avec l'Equateur (lancement de satellites géostationnaires facilité)
- Avantages multiples quant aux tirs (nombreux azimuts disponibles, facilités de lancement vers les pôles)
- Des installations relativement simples à aménager en centre spatial (ports, aéroport, routes, etc)
- Possibilité d'installation de matériel de mesure et de détection sur les collines environnantes (radars – télémétrie)
- Territoire Français : stabilité politique et sociale
- Zone non sujette aux séismes et aux cyclones

Le CNES et le Centre Spatial Guyanais (CSG) s'installent en 1965 à Kourou et son aménagement débute en 1966, permis grâce au choix fait par Georges Pompidou (Premier Ministre) et transcrit dans l'arrêté ministériel du 14 avril 1964.

I.2 - Missions du CSG

Le CSG a été construit afin d'accomplir différentes tâches et missions. Il est considéré comme le port spatial de l'Europe et est ainsi dénommé : « Centre Spatial Guyanais, Port Spatial de l'Europe ».

Les missions principales qu'il doit réaliser reflètent la politique de transport spatial tenue par l'Europe de manière globale :

A – Garantir un accès indépendant à l'espace

Cette mission permet d'accomplir les missions relevant de la souveraineté Européenne et c'est pour cette raison que l'on peut trouver des installations de l'Agence Spatiale Européenne (European Space Agency (ESA) en anglais) au CSG.

B – Occuper la première place mondiale en termes de services de lancement et la tenir

La création de la société Ariespace en 1980 et sa prise de contrôle des services de lancement ainsi que sa participation aux lancements à buts commerciaux facilita la réalisation de cette mission et ses effets perdurent encore aujourd'hui.

I.3 - Infrastructures et industries

On retrouve dans le CSG de nombreuses installations servant à la conception, la production et le tir des lanceurs spatiaux.

A titre non exhaustif, voici les installations que l'on peut trouver dans le CSG :

- Centre Technique (comprenant le Centre de Contrôle Jupiter et le Musée de l'Espace)
- Ensemble de Préparation des Charges Utiles (EPCU)
- Ensembles de lancement Ariane-Soyouz-Vega
- Installations de production et d'essai
- Stations de localisation et de télémessures
- Stations de contrôle de satellites Diane
- Autres installations techniques (télécommunications, etc)

Parmi les sociétés que l'on peut retrouver sur le CSG, il y a :

- **Regulus** : exploitant de l'Usine **Propergol** de Guyane (UPG)
- **Europropulsion** : exploitant du Bâtiment d'Intégration des Propulseurs
- **Air Liquide Spatial Guyane** : exploitant des unités de production d'**hydrogène** et d'**oxygène** liquide.
- **ArianeSpace**
- **ESA**

I.4 - Etude de l'environnement du CSG

Le CSG se situe en bord du littoral guyanais et est entourée par une faune et une flore conséquente. Il s'étend sur 700km² et comprend donc lui aussi une végétation abondante et de nombreuses espèces animales.

En ce qui concerne la **flore**, on peut trouver sur le site même du CSG :

- Des marais transitoires – d'eau douce – à savanes graminées
- Des savanes
- Des forêts marécageuses – denses ombrophiles – humides sempervirentes
- Le fleuve Kourou
- Des criques
- Le littoral
- Des battures
- Des mangroves
- Les Îles du Salut

Quant à la **faune**, on y retrouve :

- 48 espèces de mammifères (Jaguar, Grand fourmilier, Chauves-souris, etc)
- 464 espèces d'oiseaux dont 58 migratrices
- Un total de 93 taxons de poissons dans les différentes criques
- 25 espèces de la famille des Sphingidae (sur le 115 recensées en Guyane).

Par exemple, en 2015, deux jaguars ont été capturés dans l'enceinte du CSG, équipés de colliers GPS permettant de suivre leurs déplacements, puis relâchés. De la même manière, les nombreux dispositifs de déclenchement automatique installés sur le site du CSG ont permis de prendre de nombreux clichés uniques de nombreux animaux.



Figure 1 - Cliché de Puma

L'environnement du CSG est donc très varié et particulièrement riche puisque de nombreuses espèces animales et végétales y ont établi domicile. Il convient donc au CSG de préserver ce patrimoine naturel de ses activités et c'est ce qu'il réalise avec :

- Les Plans de Mesure dans l'Environnement (PME)
- Le Plan de gestion du domaine du CSG

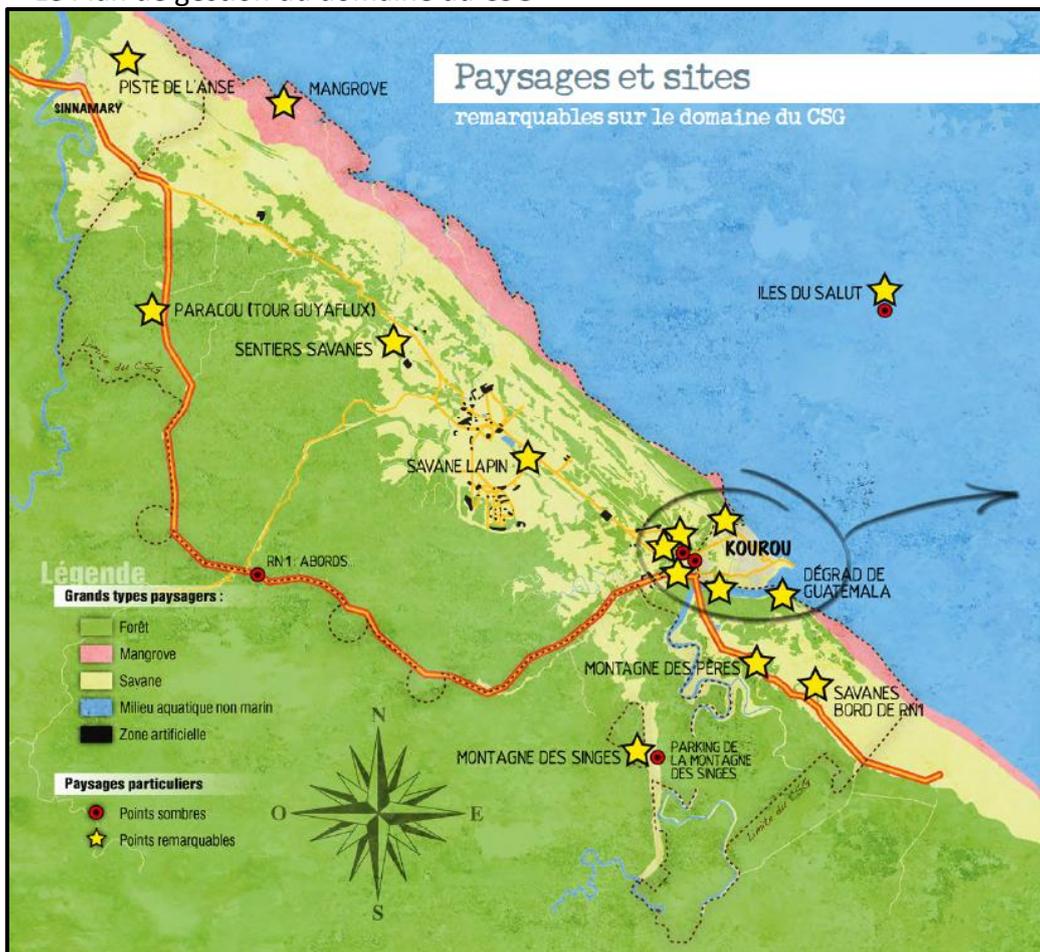


Figure 2 – Carte représentative du domaine du CSG

II - LES LANCEURS

Lors de la guerre froide, il a rapidement été compris que pour envoyer des satellites et des hommes dans l'espace, il était nécessaire d'utiliser des matériels suffisamment puissants et permettant de s'arracher à la gravité terrestre. Les lanceurs sont donc nés pour assurer cette mission et fonctionnent selon la loi d'action-réaction énoncée par Newton : à toute action correspond une action égale et opposée.

II.1 - Historique – Dates marquantes

09.04.1964 : 1^{er} lancement d'une **fusée sonde Véronique** au CSG

24.12.1979 : 1^{er} lancement **Ariane 1**

04.08.1984 : 1^{er} lancement **Ariane 3**

30.03.1986 : 1^{er} lancement **Ariane 2**

15.06.1988 : 1^{er} lancement **Ariane 4**

04.06.1996 : 1^{er} lancement **Ariane**

A – Types de lanceurs

Le CSG a servi et sert actuellement de zone de tir à de nombreux lanceurs, en voici une liste non-exhaustive, celle des plus connus :

- Ariane 1
- Ariane 2
- Ariane 3
- Ariane 4
- Ariane 5
- Vega
- Soyouz

Les lanceurs actuellement en service sont Ariane 5, Vega et Soyouz.

B – Caractéristiques techniques basiques

Lanceur	Masse (tonnes)	Hauteur	Capacité d'emport (tonnes)
Ariane 1	210	47,4	1,85
Ariane 2	219	48,9	2,21
Ariane 3	240	48,9	2,72
Ariane 4	245 à 484	54,9 à 58,7	2,13 à 4,95
Ariane 5	Variable	Variable	Variable

III – ARIANE 5 ESC-A : FONCTIONNEMENT – PRODUITS – ENVIRONNEMENT

Au fil du temps, de nombreuses techniques deancements ont été utilisées comme par exemple la combustion de kérosènes. Aujourd’hui, d’autres techniques sont utilisées et le moyen utilisé afin de propulser Ariane 5 est de provoquer une réaction chimique extrême entre un comburant et un carburant.

III.1 - Caractéristiques techniques d’Ariane 5 ESC-A

Le lanceur spatial Ariane se décline sous plusieurs versions, dont certaines ne sont plus commercialisées aujourd’hui. La version la plus utilisée de nos jours est la version Ariane 5 ESC-A signifiant Etage Supérieur Cryotechnique A et constituant sa différence majeure par rapport aux autres lanceurs du même modèle. C’est cette version que nous allons étudier.

Dans les faits, le lanceur est constitué ainsi :



Figure 3 – Vue éclatée d’Ariane 5

Comme expliqué précédemment, le principe de fonctionnement d’Ariane 5 est de provoquer une réaction chimique extrême entre un comburant et un carburant, à l’origine d’une poussée suffisante pour quitter la Terre.

Ces produits sont répartis de différentes manières dans le lanceur et sont les suivants :

- **Étages d'Accélération à Poudre (EAP) :**
 - Servent à aider le lanceur / fonctionnent les 2 première minutes
 - Propergols solides : 240 tonnes chacun
- **Étage Principal Cryotechnique (EPC) :**
 - Sert à donner la poussée finale pour mettre en orbite les satellites
 - LH2 (Hydrogène liquide) : 25 tonnes
 - LOX (Oxygène liquide) : 150 tonnes
- **Étage Supérieur Cryotechnique (ESC-A) :**
 - Donne la poussée au lanceur pour sortir de l'atmosphère et s'éloigner de la Terre
 - LH2 : 2,7 tonnes
 - LOX : 12 tonnes
- **Case à équipements :**
 - Hydrazine : 70 à 210kg
- **Satellites :**
 - Ergols variables : Maximum environ 9 tonnes

Les produits réagissent donc entre eux chimiquement et fournissent à la fusée une puissance considérable, équivalente à celle fournie par une centrale nucléaire.

III.2 – Chronologie d'un lancement

Un lancement de fusée se prépare des mois et des mois à l'avance. Dans le cas d'Ariane 5, de nombreuses précautions sont prises relativement à la proximité du lancement.

Ici, nous nous intéressons à la chronologie du lancement, lorsque tout est prêt, et que la fusée n'attend que son décollage. La séquence de décollage suivante correspond au lancement « typique » de satellites destinés à atteindre une orbite géostationnaire.

Heure H	Altitude	Evènement
H0 – 7 min	---	Début de la séquence finale lanceur
H0 – 4 s	---	Les calculateurs gèrent les dernières opérations de démarrage des moteurs et du décollage
H0	---	Allumage du moteur Vulcain 2 de l'étage principal (EPC)
H0 + 7,05s	---	Allumage des étages d'accélération à poudre ou « boosters » (EAP) – Décollage
2 min 20 s	60 km	Séparation des étages d'accélération à poudre (EAP)
3 min 20 s	110 km	Largage de la coiffe
8 min 58 s	173 km	Extinction de l'étape principal cryotechnique (EPC)
9 min 08 s	173 km	Allumage du moteur HM7 de l'étage supérieur (ESC-A)
25 min 0 s	700 km	Extinction du moteur de l'étage supérieur

III.3 – Lancement en situation normale

Réactifs - Réactions chimiques - Produits

En situation normale, le lancement se déroule selon les paramètres pré-établis et environ une demi-heure après le départ du lanceur, les satellites ont atteint leur orbite prévue.

Cette sous partie explique les différentes réactions chimiques ayant lieu et présente les réactifs, ainsi que les produits.

Bilan des réactifs :

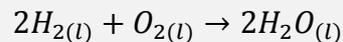
▪ *Propergols solides des EAP*

- Perchlorate d'ammonium : NH_4ClO_4
- Aluminium : Al
- Poly-butadiène : $-[CH_2 - CH = CH - CH_2]_n-$

▪ *Ergols liquides de l'EPC et de l'ESC-A*

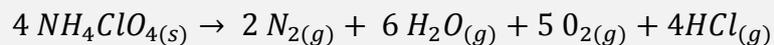
- Dihydrogène : H_2
- Dioxygène (O₂) : O_2

REACTION CHIMIQUE DANS L'EPC ET L'ESC-A :

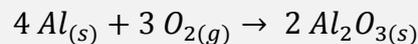


REACTIONS CHIMIQUES DANS LES EAP :

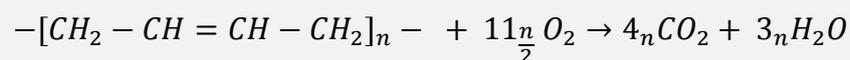
Réaction d'oxydo-réduction entre l'ion ammonium et l'ion perchlorate :



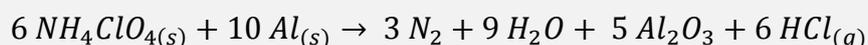
Réaction d'oxydation de l'aluminium (très exothermique) :



Réaction du polybutadiène (très exothermique) :



Réaction bilan dans les EAP :



Bilan des produits :

- *Produits issus de la réaction dans l'EPC et l'ESC-A :*
 - Eau : H_2O

- *Produits issus des réactions dans les EAP :*
 - Oxyde d'aluminium : Al_2O_3
 - Diazote : N_2
 - Eau : H_2O
 - Dioxygène : O_2
 - Chlorure d'hydrogène : HCl
 - Dioxyde de carbone : CO_2

III. 4 – Lancement en situation accidentelle

Généralement, en situation accidentelle, le tir est effectué correctement, mais un évènement entraîne la destruction du lanceur : mauvais suivi des paramètres d'ascension ou de lancement, rotation sur lui-même, défaillance technique, etc.

Au moment où le lanceur se désintègre, une partie des réactifs chimiques a réagi et s'est décomposée dans les produits cités précédemment. Cependant, la majorité des réactifs est encore dans le lanceur, et sa destruction entraîne leur dispersion.

La liste est donc la même que celle des réactifs stockés dans le lanceur.

Pour rappel :

- **EAP**
 - Perchlorate d'ammonium : NH_4ClO_4
 - Aluminium : Al
 - Poly-butadiène : $-[CH_2-CH=CH-CH_2]_n-$
- **EPC :**
 - Dihydrogène : H_2
 - Dioxygène (O₂) : O_2
- **ESC-A :**
 - Dihydrogène : H_2
 - Dioxygène (O₂) : O_2
- **Case à équipements :**
 - Hydrazine : N_2H_4

III.5 – Etude toxicologique des produits

A – Oxyde d'aluminium

Désignation	CAS	
Oxyde d'aluminium	1344-28-1	
Classification et Risques		
Mention de danger selon le Règlement CE N°1272/2008	Pas de pictogrammes	Pas de mentions de danger
Toxicité		
Animaux : - Cytotoxique - Inflammations pulmonaires - A priori non cancérigène - A priori non fibrogène	Homme : - Susceptible de provoquer des fibroses pulmonaires - Potentiel de rétention certain - Susceptible de causer des lésions cérébrales (à l'origine de la maladie d'Alzheimer)	
Autres		
VLEP_{8h} : - Fraction totale (poussières inhalables) = 10 mg/m ³ - Fraction alvéolaire = 5 mg/m ³		

Source : INRS – Fiche toxicologique – Oxyde d'aluminium

B – Diazote

Désignation	CAS	
Diazote	7727-37-9	
Classification et Risques		
Mention de danger selon le Règlement CE N°1272/2008	Pas de pictogrammes	Pas de mentions de danger
Toxicité		
Pas de toxicité : gaz présent naturellement dans l'atmosphère et nécessaire à la vie.		
Autres		
Sans objet.		

Source : Propriétés physico-chimiques – Encyclopédie Gaz Liquide

C – Eau

Désignation	CAS	
Eau	7732-18-5	
Classification et Risques		
Mention de danger selon le Règlement CE N°1272/2008	Pas de pictogrammes	Pas de mentions de danger
Toxicité		
Pas de toxicité : molécule présente naturellement sur Terre et nécessaire à la vie.		
Autres		
Sans objet.		

D - Dioxygène

Désignation	CAS	
Dioxygène	7782-44-7	
Classification et Risques		
Mention de danger selon le Règlement CE N°1272/2008	Pas de pictogrammes	Pas de mentions de danger
Toxicité		
Pas de toxicité : molécule présente naturellement sur Terre et nécessaire à la vie.		
Autres		
Sans objet.		

E – Chlorure d'hydrogène

Désignation	CAS	
Chlorure d'hydrogène	7647-01-0	
Classification et Risques		
Mention de danger selon le Règlement CE N°1272/2008	 	H331 – Toxique par inhalation H314 – Provoque des brûlures de la peau et des lésions oculaires graves
Toxicité		
Animaux : <ul style="list-style-type: none">- Irritations de la peau entre 3,3% et 17%- Corrosif pour la peau au-dessus de 17%- Irritations graves de l'œil au-dessus de 3,3%- Irritant respiratoire- Toxicité chronique si exposition à long terme- Non mutagène- Non reprotoxique- Non cancérigène Végétaux : <ul style="list-style-type: none">- Corrode les végétaux- Entraîne une dégradation – nécrose des surfaces foliaires	Homme : <ul style="list-style-type: none">- Brûlures chimiques de la peau, des yeux et muqueuses respiratoires et digestives- Irritation chronique si exposition à long terme- Brouillard classé dans le groupe 1 des substances cancérigènes- Etouffement – difficultés respiratoires (50ppm)- Œdème pulmonaire (1000ppm)- Non reprotoxique- Non mutagène	
Autres		
Environnement : Classement ICPE possible si utilisation ou ayant activités en relation VLEP 15_{min} : - 7,6 mg/m ³ - 5 ppm		

Source : INRS – Fiche toxicologique – Chlorure d'hydrogène

F – Dioxyde de carbone

Désignation		CAS
Dioxyde de carbone		124-38-9
Classification et Risques		
Mention de danger selon le Règlement CE N°1272/2008	Pas de pictogrammes	Pas de mention de danger
Toxicité		
Animaux : Mortel a fortes concentrations	Homme : Mortel à fortes concentrations	
Autres		
Sans objet.		

G – Perchlorate d'ammonium

Désignation		CAS
Perchlorate d'ammonium		7790-98-9
Classification et Risques		
Mention de danger selon le Règlement CE N°1272/2008		H201 – Explosif ; danger d'explosion en masse H271 – Peut provoquer un incendie ou une explosion ; comburant puissant
Toxicité		
Animaux : Effets identiques à ceux sur l'Homme	Homme : - Irritation des yeux, de la peau et du système respiratoire - Effets sur la thyroïde en cas d'exposition prolongée (hypothyroïdie)	
Végétaux :		
Autres		
Environnement :		

Source : International Labour Organisation

H - Polybutadiène

Désignation	CAS	
1,3-butadiène (polybutadiène)	06-99-0	
Classification et Risques		
Mention de danger selon le Règlement CE N°1272/2008		H220 – Gaz extrêmement inflammable H350 – Peut provoquer le cancer H340 – Peut induire des anomalies génétiques
Toxicité		
Animaux : - Toxique à haute concentration - Effets cancérogènes - Effets sur la reproduction Végétaux :	Homme : - Irritations respiratoires et oculaires - Signes neurologiques (jusqu'au coma) - Entraîne potentiellement des leucémies ou des cancers lymphatiques	
Autres		
Sans objet.		

INRS – Fiche toxicologique – 1,3-butadiène

I – Aluminium

Désignation	CAS	
Aluminium	7429-90-5	
Classification et Risques		
Mention de danger selon le Règlement CE N°1272/2008		H261 – Dégage au contact de l'eau des gaz inflammables H228 – Matière solide inflammable
Toxicité		
Animaux : - Diminution de la fertilité Végétaux :	Homme : - Fibrose pulmonaires, asthme, altérations chroniques fonction ventilatoire (expositions massives)	
Autres		
VME : 10mg/m ³ (métal)		

J – Hydrazine

Désignation	CAS	
Hydrazine	301-01-2	
Classification et Risques		
Mention de danger selon le Règlement CE N°1272/2008		<p>H226 – Liquides et vapeurs inflammables H350 – Peut provoquer le cancer H331 – Toxique par inhalation H311 – Toxique par contact cutané H301 – Toxique en cas d'ingestion H314 – Provoque des brûlures de la peau et des lésions oculaires graves H317 – Peut provoquer une allergie cutanée H410 – Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme</p>
Toxicité		
<p>Animaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Toxique quelle que soit la voie d'entrée - Irritations cutanée et respiratoires - Hépatotoxique - Génotoxique - Cancérogène quelle que soit la voie d'exposition <p>Végétaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Corrosif sur les végétaux 	<p>Homme :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Irritations des muqueuses oculaires et respiratoires - Brûlures graves de la peau et des yeux - Intoxication aiguë très sévère (foie, reins, poumons, système nerveux central) - Peut potentiellement provoquer le cancer 	
Autres		
VME : 0.1mg/m ³		

III.6 – Lancement en situation normale

A – Bilan toxicologiques des rejets

Comme nous venons de le voir, les réactifs chimiques utilisés afin de produire une poussée suffisamment puissante pour arracher le lanceur du sol sont peu nombreux. Pour la plupart, les produits issus des réactions chimiques sont inoffensifs, à l'exception de :

- L'oxyde d'aluminium, dont les effets toxicologiques ont été étudiés mais ne peuvent pas être établis avec certitudes, il subsiste donc un doute sur certains effets ;
- Le chlorure d'hydrogène, qui a des effets toxicologiques connus et démontrés.

Ainsi, lors d'un tir de lanceur spatial, en l'occurrence le lanceur Ariane 5 ESC-A, ces produits sont relâchés en quantité les produits que l'on vient de citer sont ceux pouvant avoir un impact, et sur l'homme, et sur l'environnement (faune et flore). Les boosters fonctionnent en continu durant 2 minutes et 20 secondes. L'oxyde d'aluminium, le chlorure d'hydrogène, le diazote, l'eau, le dioxygène et le dioxyde de carbone sont expulsés dans ce laps de temps et sont répandus sur une hauteur de 60 kilomètres.

Selon le CSG, chaque tir rejette en moyenne dans l'environnement :

- Chlorure d'hydrogène : 44,9 tonnes
- Oxyde d'aluminium : 74,5 tonnes
- Monoxyde de carbone et dioxyde de carbone : 59,9 tonnes

Il s'intègre également la composante concernant les émissions de dioxyde de carbone. Gaz à effet de serre, ayant essentiellement un impact sur le réchauffement climatique. A titre de comparaison, un lancement de tir d'Ariane 5 équivaut à 30 allers-retours de Paris à New-York en avion : ce rejet n'est donc pas négligeable.

B– Impacts directs sur l'environnement

Ces produits sont donc susceptibles d'avoir des impacts sur l'environnement du site mais aussi l'environnement plus annexe, à cause de la dispersion des produits dans l'atmosphère et au sol par les produits.

Les chutes de pluies faiblement acides peuvent être observées, toutefois, compte-tenu de la dilution important en altitude et haute-altitude de ces différents produits, la probabilité est faible. La même chose se passe pour l'oxyde d'aluminium : la dilution lui permet d'éviter d'être néfaste pour la santé.

III.7 – Lancement en situation accidentelle

A – Bilan toxicologiques des rejets

De la même manière, un lancement en situation dégradé amène le lanceur à rejeter des produits. Ceux-ci sont différents d'un lancement normal et potentiellement bien plus dangereux et l'hydrazine en est la preuve : produit dangereux pour l'Homme, les animaux et les végétaux sous de nombreux aspects.

Ainsi, si on suppose le décollage d'un lanceur interrompu accidentellement peu après le tir, les quantités de produit dangereux suivantes sont susceptibles d'être dispersées à faible altitude :

- Perchlorate d'ammonium – Aluminium – Poly-butadiène : 2 x 240 tonnes
- Hydrazine : entre 70kg et 210kg

D'après les données toxicologiques fournies précédemment, ces produits sont particulièrement nocifs pour l'Homme et les animaux par leurs caractères toxiques multiples et dangereux.

Néanmoins, la large zone de terrain du CSG permet une exclusion de la population : elles ne sont donc pas touchées par ce type d'évènement.

B– Impacts directs sur l'environnement

Selon le CNES – CSG, les impacts de l'explosion d'un lanceur varient selon l'emplacement du lanceur au moment de son explosion : près du pas de tir ou en altitude et au-dessus de l'océan.

Près du pas de tir : « *Les impacts sur l'environnement restent très localisés (et mesurés) autour de la zone de lancement d'Ariane 5. Des effets du gaz chlorhydrique, de l'alumine, des produits hydrazinés et des oxydes d'azote peuvent être observés sur :*

- *la qualité de l'air environnant,*
- *l'environnement terrestre (faune, flore, etc.). »*

Au-dessus de l'océan : la dispersion des produits impacte inévitablement la qualité de l'air environnant. Cependant, le CNES précise que le vent ramenant cet air vicié vers la côte effectue un travail de dilution et permet de supprimer le caractère dangereux de ces produits. Pour preuve : les tirs qui ont donné lieu à une explosion au-dessus de l'océan ont dispersé des produits, ramenés par les vents jusqu'aux côtes, où leurs teneurs toxiques étaient inférieures aux seuils réglementaires. Dans tous les cas, on voit qu'à partir du moment où le lanceur explose, que ce soit au niveau du sol ou en altitude, il y a des conséquences immédiates pour l'environnement direct. Cependant, la source d'émission des produits n'étant pas constante mais spontanée, la dilution (notamment en altitude) se réalise assez bien, et n'impacte pas la population.

En revanche, il est important de préciser qu'au sol, les rejets sont plus difficilement dilués et que les impacts peuvent être importants.



Figure 4 – Végétaux « attaqués » par du chlorure d'hydrogène

III.8 – Mesures et moyens de prévention – protection

A – Cadre réglementaire

En plus des autorisations nécessaires au tir d'un lanceur spatial, la loi 2008- 518 du 3 Juin 2008, un dommage provoqué par une activité spatiale est défini comme « toute atteinte aux personnes, aux biens, et notamment à la santé publique ou à l'environnement directement causée par un objet spatial dans le cadre d'une opération spatiale. »

De plus, l'article L.161-1 du Code de l'Environnement stipule que :

« Constituent des dommages causés à l'environnement au sens du présent titre les détériorations directes ou indirectes mesurables de l'environnement qui :

1° Créent un risque d'atteinte grave à la santé humaine du fait de la contamination des sols résultant de l'introduction directe ou indirecte, en surface ou dans le sol, de substances, mélanges, organismes ou micro-organismes ;

2° Affectent gravement l'état écologique, chimique ou quantitatif ou le potentiel écologique des eaux, y compris celles de la zone économique exclusive, de la mer territoriale et des eaux intérieures françaises, à l'exception des cas prévus au VII de [l'article L. 212-1](#) ;

3° Affectent gravement le maintien ou le rétablissement dans un état de conservation favorable » certaines espèces citées dans d'autres articles de loi ;

« 4° Affectent les services écologiques, c'est-à-dire les fonctions assurées par les sols, les eaux et les espèces et habitats mentionnés au 3° au bénéfice d'une de ces ressources naturelles ou au bénéfice du public, à l'exclusion des services rendus au public par des aménagements réalisés par l'exploitant ou le propriétaire. »

Ainsi, afin d'éviter tout dommage, à l'environnement, le droit Français impose aux exploitants spatiaux et au CSG de mettre en place des mesures de protection de l'environnement et de surveillance. De nombreuses mesures sont prises par le CSG en Guyane et parmi elle, la surveillance des animaux faisant partie du site de lancement par l'Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage (ONCFS). De cette manière, tout est fait pour que les impacts les plus importants soient limités à un rayon de 1 kilomètre.

De plus, l'arrêté n°1632 1D/1B/ENV du 24/07/2006 donnant l'autorisation à la société Ariespace d'exploiter l'Ensemble de Lancement Ariane (ELA) sur la commune de Kourou stipule que, dans le cadre de la surveillance des effets sur l'environnement des lancements :

« A l'occasion de chaque tir du lanceur Ariane 5, exploité sur l'ELA, l'exploitant doit en outre assurer une surveillance de la qualité de l'air et des retombées de poussières, dans les atmosphères des agglomérations de Kourou et de Sinnamary ainsi que sur le site de la base spatiale » (Article 8.2.5)

« Le nombre de points de mesures et de conditions dans lesquelles les appareils de mesure doivent être installés et exploités sont soumis à l'approbation de l'inspection des installations classées » (Article 8.2.5.1)

« Les contrôles de la qualité de l'air portent à minima sur les paramètres suivants :

- Acide chlorhydrique
- Alumine
- Peroxyde d'azote
- Produits hydrazinés » (Article 8.2.5.2)

Les mesures de sûreté, sauvegarde des personnes, des biens et de l'environnement sont assurées par le Service Environnement et Sauvegarde Sol du CNES/CSG.

B – Mesures réalisées à chaque lancement

Voici la liste des mesures réalisées par le CSG et le CNES afin de surveiller les différents impacts que peuvent avoir les tirs de lanceurs spatiaux.

1 - Surveillance des espèces animales par l'ONCFS

Comme nous venons de le voir, l'ONCFS est chargé de mener une surveillance sur les espèces animales se trouvant sur le site afin de s'assurer qu'ils ne subissent aucun dommage lors des tirs. Ainsi, en 2017, un jaguar résidant au sein du site de lancement a été aperçu de nombreuses fois, notamment près du pas de tir d'Ariane 5.

2 – Prévisions pour la mise en place des capteurs

Le CSG possède un logiciel de prévision des rejets, en fonction de la météorologie, des conditions de tir, de l'environnement et qui permet d'installer des moyens de mesure des produits rejetés lors d'un lancement : le logiciel SARRIM.

3 – Analyse de la qualité de l'air

La qualité de l'air du site et environnant au site est mesurée en permanence au biais de 24 appareils de mesures en continu fixes et de nombreux autres appareils de mesures en continu mobiles.

4 – Analyse de la qualité du sol et des retombées

De nombreux pièges à eau sont disposés sur le site du CSG : environ 45, qui permettent de mesurer les retombées en alumine et en chlorure d'hydrogène. L'eau fournit

ainsi de nombreuses informations lors de analyses, comme le pH, la conductivité, les chlorures, les aluminiums, etc.

5 – Analyse des eaux de surface et souterraines

Les eaux de surface sont prélevées dans des criques proches du site par des préleveurs automatiques et les eaux souterraines le sont par des piézomètres. Elles sont analysées sur leur pH, conductivité, taux en chlorures, aluminium et sodium.

6 – Bruit et Vibration

Ces éléments sont mesurés à de nombreux endroits du site. Lors d'un lancement d'Ariane 5, le niveau sonore sur le site Toucan est de 110dB durant 1 à 2 minutes. L'hôtel des Roches se trouvant non loin subit un niveau sonore de 100dB durant la même durée.

7 – Végétation

La végétation est suivie grâce à l'analyse des pluviollessivats au niveau de leur teneur en cations, anions, pH, conductivité), qui sont de bons indicateurs renseignant sur la capacité d'amortissement de la pollution par la végétation.

8 – Faune aquatique

Différents suivis sont réalisés : abondance, diversité, différents espèces dominantes et leurs caractéristiques, recherches de lésions et dosages d'aluminium dans les chairs.

Toutes ces mesures et suivis sont réalisés par de nombreuses organismes spécialisées et qualifiées dans le domaine.



Figure 5 – Organismes œuvrant pour l'environnement du CSG

IV – ETUDE DE CAS : VOL VA238 – PRINCIPE – EFFETS – IMPACTS

Cette partie est consacrée à présenter le Plan de Mesure dans l'Environnement mis en place lors du lancement d'Ariane 5 (version ECA) lors du **vol VA238** qui a eu lieu le mercredi 28/06/2017 à 18h15 heure locale.

IV.A – Présentation et résumé

Le compte-rendu du PME est en quelques sortes constitué comme une étude de danger : résumé non technique initial, plan de mise en place de capteurs, simulation de rejets lors du lancement, résultats bruts et exploitation puis conclusion.

Pour ce qui est du résumé non technique, il présente bien les informations essentielles du PME :



RESULTATS DU PLAN DE MESURES ENVIRONNEMENT VOL ARIANE 5 VA238

Arrêté préfectoral N°1632 1D/1B/ENV du 24 juillet 2006 autorisant l'exploitation de l'Ensemble de Lancement Ariane (ELA) sur la commune de Kourou

Mer
28
juin



Etages d'Accélération à Poudre(EAP)
480 tonnes de propergol solide

Composés majoritaires du nuage de combustion de propergol

Acide chlorhydrique (HCl) + Alumine (Al₂O₃)

Carte du CSG et répartition des capteurs





Ariane 5 version ECA
Mercredi 28 juin 2017 à 18h15 (Heure locale).

Le vol 238 en bref :

2 Satellites de télécommunication
Hellas Sat 3 – Inmarsat S EAN (HS3-IS) & GSAT-172

DIRECTION PRISE PAR LE NUAGE DE COMBUSTION	EMPLACEMENT DES CAPTEURS	DETAILS DE L'INSTRUMENTATION
<p style="text-align: center;">Direction 124° soit vers Sinnamary donc une direction nord – nord-ouest</p> <p style="font-size: small; text-align: center;"><i>en cohérence avec la mise en place de capteurs au matin du lancement VA238</i></p>	10 sites en champ proche (Zone de Lancement)	10 bacs à eau 2 analyseurs mobiles
	35 sites en champ lointain (Kourou / Sinnamary / RN1 / CSG)	35 bacs à eau 1 analyseur mobile
	Réseau CODEX (Kourou / Sinnamary/ CSG)	24 analyseurs fixes
	PARAMETRES DE MESURE	
	Bacs à eau	pH / Conductivité / Aluminium particulaire / Chlorure
	Analyseurs mobiles	Acide chlorhydrique en continu
	Analyseurs fixes	Acide chlorhydrique / Produits hydrazinés / Dioxyde d'azote

Des rappels sur la réglementation applicable et qui impose ces mesures au CNES/CSG sont faits au début du rapport de résultats et permettent de bien comprendre le contexte juridique. Une des premières mesures en ressortant est l'utilisation du logiciel SARRIM.

Afin de satisfaire aux différentes exigences de l'arrêté n°1632/1D/1B/ENV, une **modélisation majorante** des retombées du nuage de combustion est réalisée selon les conditions

météorologiques prévues lors du lancement. A partir de cette simulation, les points de mesures sont définis et du matériel est mis en place.

Nous avons également un compte-rendu du contexte météorologique le jour du vol.

Le but du PME est le suivant :

- « Mesurer en temps réel et en différents lieux [...] les concentrations atmosphériques en acide chlorhydrique »
- « Mesurer les concentrations en champ proche, moyen et lointain, des retombées chimiques particulières en alumine et en acide chlorhydrique ainsi que les retombées chimiques gazeuses en acide chlorhydrique »
- Réaliser « une corrélation avec les résultats trouvés avec un logiciel de modélisation nommé « Stratified Atmosphere Release of Rockets Impact Model (SARRIM) »

IV.B – Prévisions, mesures et suivis réalisés

1 – Prévisions et suivi des retombées

Comme nous venons de le voir, des modélisations sont réalisées afin de déterminer les emplacements des systèmes de mesures et des bacs à eau et de suivre le déplacement du nuage de combustion. Pour cela, des prévisions sont réalisées avec le logiciel SARRIM en fonction des données météorologiques lors du lancement.

Quelques heures après le lancement, un radiosondage est effectué et ses données sont intégrées au logiciel SARRIM qui modélise un déplacement du nuage et estime les concentrations des différents produits. Ainsi, voici le déplacement du nuage selon la prévision météorologique du 28/06/2017 à 18h00 UTC.

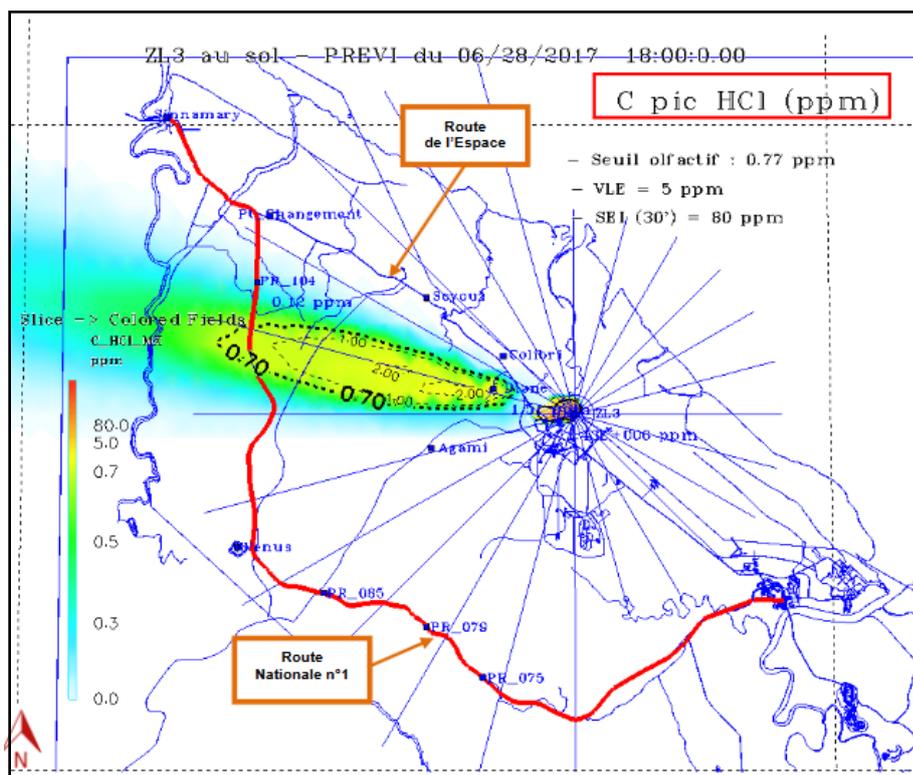


Figure 7 – Simulations de retombées selon la prévision météo

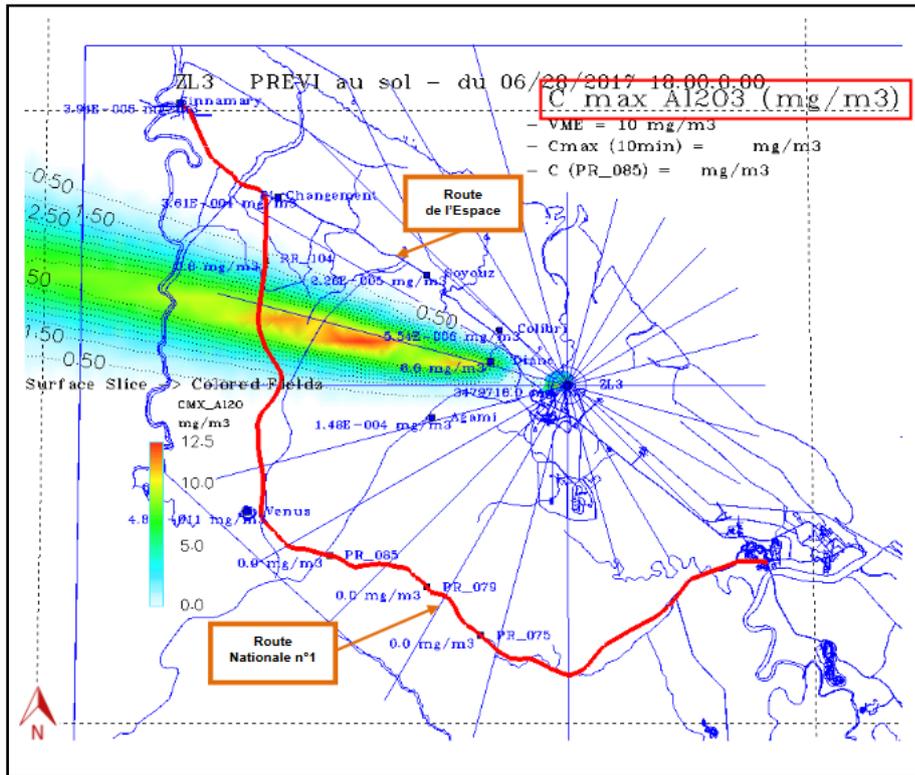


Figure 8 – Simulations de retombées selon la prévision météo

Pour ce lancement, les capteurs permettant les mesures en champ proche, moyen et lointain ont été disposés selon la modélisation réalisée à l'aide des prévisions météorologiques.

Et voici les résultats grâce au radiosondage effectué le 29/06/2017 à 21h40 UTC :

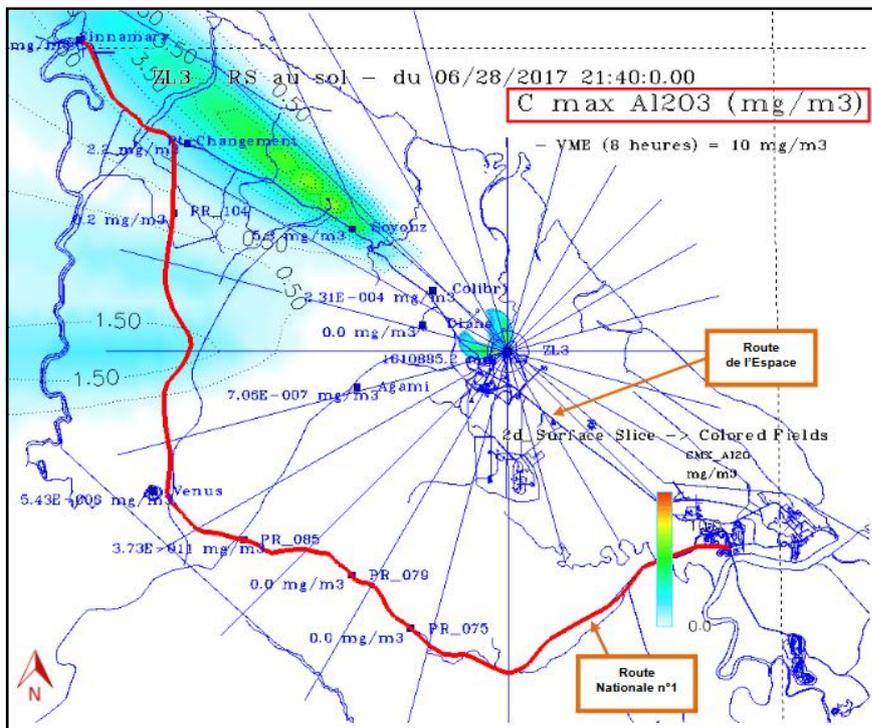


Figure 8 – Simulations de retombées selon le radiosondage

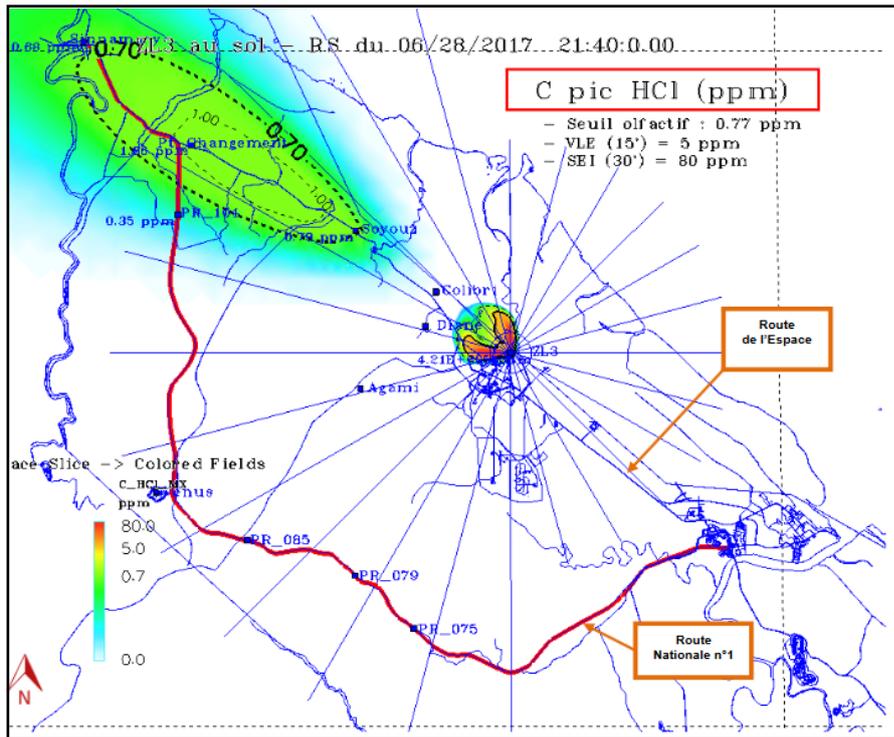


Figure 9 – Simulations de retombées selon le radiosondage

Maintenant, voici la comparaison réalisée par le CNES/CSG permettant de confirmer l'état idéal de disposition des capteurs :

	PREVISION METEOROLOGIQUE 2C280617 DU 28 JUIN 2017 À 18H00 TU	RADIOSONDAGE CP 5R280617 DU DU 28 JUIN 2017 À 21H40 TU
HAUTEUR DE STABILISATION DU NUAGE (m)	1002	1100
BASSES COUCHES (0 → HAUTEUR DE STABILISATION)		
- Direction moyenne des vents (°)	102	124
- Concentration maximale en acide chlorhydrique en champ lointain (ppm)	2,6	1,2
- Concentration maximale en alumine particulaire en champ lointain (mg/m ³)	12,4	8,7

Ainsi, selon le CNES/CSG, le radiosondage confirme le bon positionnement des capteurs, malgré un léger changement de direction du vent au moment du lancement : le nuage de combustion est bien passé au-dessus de ces derniers.

La première conclusion sur ce PME est donc la suivante :

« On retiendra que le plan de mesure environnement VA238 a été déployé de façon optimale et que les mesures réalisées restent conformes aux prescriptions de l'arrêté préfectoral puisqu'elles demeurent inférieures aux seuils réglementaires d'exposition (VLE et VME). En outre, le dispositif a permis de démontrer l'absence de pollution à l'intérieur et à l'extérieur du périmètre du Centre Spatial Guyanais. »

2 – Suivi des retombées chimiques gazeuses et particulaires en champ proche, moyen et lointain

L'objectif des mesures en champ proche, moyen et lointain des retombées chimiques particulaires et gazeuses est d'évaluer leur importance et leurs éventuelles conséquences sur l'environnement. Voici un détail de l'instrumentation disposée :

DETAILS DE L'INSTRUMENTATION	
<u>Champ Proche</u>	<u>Champ Lointain</u>
10 bacs à eau	35 bacs à eau
2 Single Point Monitor HONEYWELL	1 Single Point Monitor HONEYWELL

- Bac à eau : permettent de contenir une quantité d'eau précise qui sera exposée aux retombées chimiques et gazeuses du nuage de combustion. Les eaux sont ensuite analysées pour déterminer les concentrations de retombées et d'estimer d'éventuels impacts sur l'environnement. Ils sont disposés à 1,50m de haut, selon la norme AFNOR NF X 43-006.

Grandeurs mesurées : pH, Conductivité, Concentration en ion chlorure, Concentration en aluminium (particulaire, dissous et totale).



Figure 12 – Simulations de retombées selon le radiosondage

- Single Point Monitor HoneyWell : les différents capteurs SPM (mobiles et fixes) constituent le réseau CODEX et permettent de mesurer les concentrations en : produits hydrazinés, dioxyde d'azote et acide chlorhydrique sous le nuage de combustion.

Et voici une carte faisant état de l'emplacement des différents moyens de mesures sur le site et aux alentours concernant ce lancement

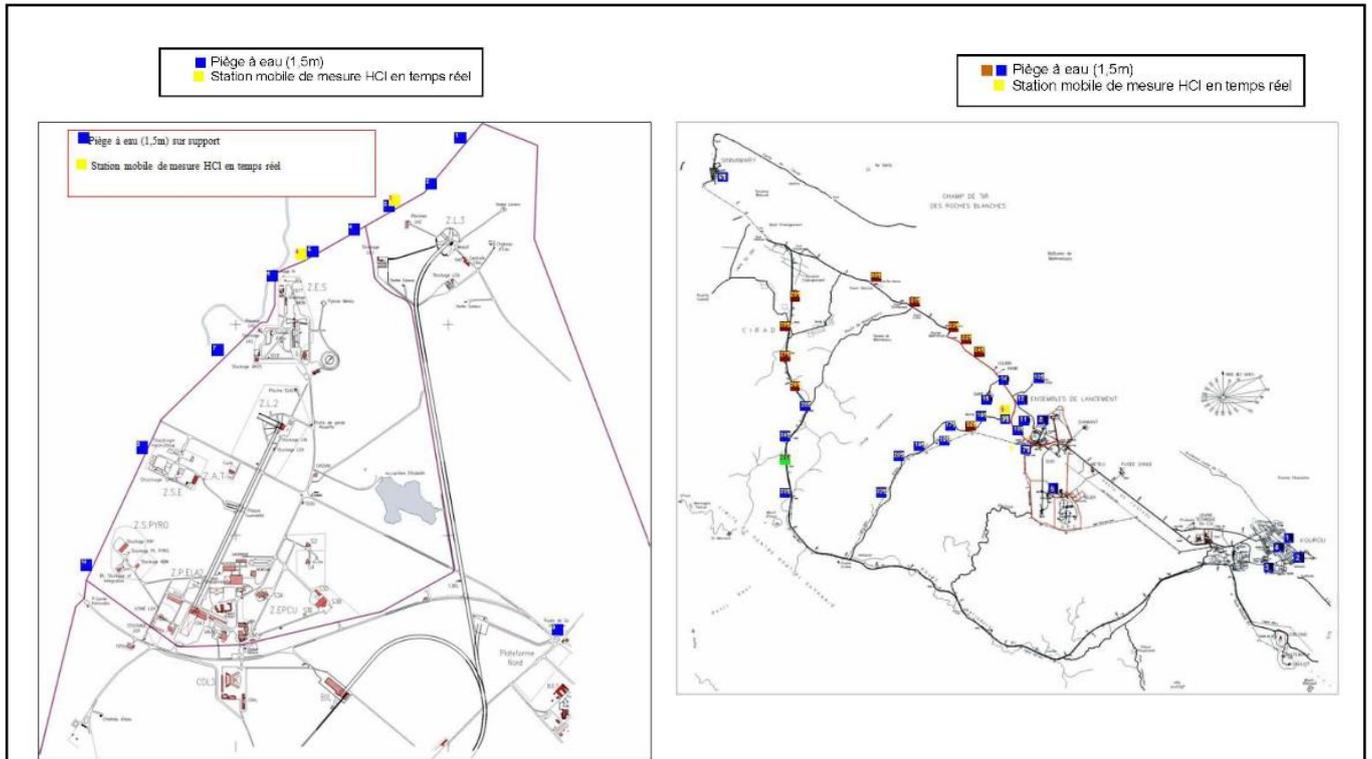


Figure 13 - Plan de localisation des moyens de mesures en champ proche et lointain

Après avoir exposé des données brutes, le rapport du CNES/CSG expose un tableau de conclusion sur ces mesures :

DIRECTION PRISE PAR LE NUAGE DE COMBUSTION					
J0 VA238 / H0 - 3 h 15		J0 VA238 / H0 + 25 min		J0 / Mesures des bacs à eau	
Modélisation à partir des données CEP (PREVI)		Modélisation à partir du radiosondage en Chronologie Positive (RS CP : H0 + 25)		Option de pose B : « Route de l'Espace » selon la modélisation de la PREVI	
102° soit vers la station Diane soit une direction ouest – nord-ouest		124° soit vers l'Ensemble de Lancement Soyuz soit une direction nord – nord-ouest		Entre 80° et 130° soit un « éventail » compris entre le sud-ouest et le nord-ouest	
HCl	2,6 ppm	HCl	1,2 ppm	HCl	19,3 mg/m ²
Al ₂ O ₃	12,4 mg/m ³	Al ₂ O ₃	8,7 mg/m ³	Al ₂ O ₃	2,91 mg/m ²

On peut donc le voir, les rejets les plus importants sont restés confinés à la zone de lancement et ne s'étendent pas sur plus de 500m mètres. Ceci s'explique notamment par l'ajout massif d'eau lors du décollage sur le pas de tir afin de faire tomber les particules gazeuses et solides. Cette eau est ensuite traitée par des filières spécialisées. Les autres rejets restent minimes et inférieurs aux seuils règlementaires. La disposition des capteurs de mesure a été optimale, grâce aux prévisions réalisées.

Le CNES/CSG conclue donc son rapport de la manière suivante :

« Au regard de l'ensemble de ces constats, nous retenons que le plan de mesures du lancement d'Ariane VA238 effectué le 28 juin 2017 s'est déroulé conformément aux prescriptions de l'Arrêté d'Autorisation d'Exploiter l'ELA3. Les résultats des mesures ont mis en évidence qu'aucun impact sur l'environnement guyanais n'est décelable. »

CONCLUSION

Cet article permet de bien comprendre les enjeux des lancements spatiaux, aussi différents qu'ils soient : économiques, commerciaux, environnementaux, etc, en essayant d'être neutre.

Comme on a pu le voir, les tirs de lanceurs spatiaux utilisent une technologie particulière, quel que soit le type de lanceur. Le lanceur pris en exemple dans cet article est le lanceur Ariane 5, le plus utilisé et probablement le moins polluant.

Peu polluant par rapport à ses compagnons, le lanceur Ariane 5 a besoin d'aide pour réaliser des lancements en orbite, grâce aux EAP. Comme nous l'avons expliqué, ce sont les EAP qui polluent le plus, compte tenu que le lanceur en lui-même ne rejette que de l'eau et du dioxyde de carbone. Cette pollution est de courte durée (environ 2 minutes) et est manifestement diluée dans l'atmosphère, par les vents et courants aériens.

Les retombées sont toutes mesurées et analysées par le CNES/CSG, qui porte un regard particulièrement attentif à la protection de l'environnement. Ainsi, le site met en place de nombreux moyens de contrôle à chaque lancement (prévisions météorologiques, simulations, modélisations, mesures, analyses, etc) et permet ainsi de démontrer que l'impact sur l'environnement est faible voire nul.

Cependant, les divers intérêts présents derrière ces tirs de lanceurs spatiaux sont conséquents, et malgré la transparence affichée de la part du CNES/CSG (par exemple au travers de la communication au public des rapports des PME à chaque tir), il serait intéressant d'avoir accès aux protocoles complets sur les moyens de contrôle et de vérification des mesures sans remettre en doute la sincérité de l'entreprise et ses motivations à préserver l'environnement. En effet, le CNES/CSG a l'air d'une entreprise sérieuse, responsable et qui est d'ailleurs certifiée ISO 14001. Au travers des différentes communications réalisées par le site, l'entreprise apparaît comme réellement soucieuse de garder l'environnement du site et ses alentours propres. Elle mobilise de nombreux moyens pour mesurer l'impact de ses activités sur la faune et la flore, notamment afin de respecter scrupuleusement la réglementation fixée.

BIBLIOGRAPHIE

- Rapport du CNES/CSG – PME VA238

http://www.cnes-csg.fr/automne_modules_files/standard/public/p11435_56c44dff1c7aab0deddbc957544333fPMEVA238.pdf

- Image Ariane page de garde :

https://www.francetvinfo.fr/sciences/espace/video-la-fusee-ariane-5-decolle-avec-quatre-satellites-europeens-galileo_1925333.html

- Historique du CSG :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Centre_spatial_guyanais#Historique

<http://www.cnes-csg.fr/web/CNES-CSG-fr/9780-les-differentes-installations-du-passe.php>

- Réactions chimiques diverses :

<https://prezi.com/tuoqlutftcxk/les-lancements-de-fusees-ont-ils-un-impact-sur-lenvironneme/>

<http://eduscol.education.fr/orbito/lanc/chimie/chim11.htm>

http://www.cnes-csg.fr/automne_modules_files/standard/public/p9768_4011e03c7b0a1a5c9055550c0be331e6Depliant_Ariane_5_2018.pdf

- Données physico-chimiques et toxicologiques - Oxyde d'Aluminium :
http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_305
- Données physico-chimiques et toxicologiques - Diazote :
<https://encyclopedia.airliquide.com/fr/azote>
- Données physico-chimiques et toxicologiques - Perchlorate d'ammonium :
http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=1255&p_edit=&p_version=1&p_lang=fr

INERIS, 2014. Données technico-économiques sur les substances chimiques en France : Perchlorate d'ammonium, DRC-13-126866-06964C, 71 p. (<http://rsde.ineris.fr/> ou <http://www.ineris.fr/substances/fr/>)

- Données physico-chimiques et toxicologiques - 1,3-butadiène :
http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_241
- Données physico-chimiques et toxicologiques – Aluminium
http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_306
- Données physico-chimiques et toxicologiques – Hydrazine
http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_21

- Articles de loi et code de l'environnement appliqués au domaine spatial :

<https://www.alain-bensoussan.com/avocats/reduire-limpact-activites-spatiales-lenvironnement/2017/09/01/>

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT000006074220&idArticle=LEGIARTI000033035418&dateTexte=&categorieLien=id>

- Dépliant environnement d'Ariane 5

http://www.cnes-csg.fr/automne_modules_files/standard/public/p9768_4011e03c7b0a1a5c9055550c0be331e6Depliant_Ariane_5_2018.pdf

- Informations Ariane 5 ESC-A / Impacts environnementaux / Plan de mesure dans l'environnement :

<http://www.cnes-csg.fr/web/CNES-CSG-fr/10016-les-differentes-versions-ariane-5.php>

http://www.cnes-csg.fr/automne_modules_files/standard/public/p9768_4011e03c7b0a1a5c9055550c0be331e6Depliant_Ariane_5_2018.pdf

- Liste des Plans de Mesure dans l'Environnement d'Ariane 5 pour chaque lancement

<http://www.cnes-csg.fr/web/CNES-CSG-fr/11435-pme-ariane.php>

- Le CSG, un espace protégé – Cliché Puma

<http://www.cnes-csg.fr/web/CNES-CSG-fr/10229-espace-protege.php>

- Plan de Gestion du CNES/CSG à l'horizon 2020

http://www.cnes-csg.fr/automne_modules_files/standard/public/p9768_70c606dba8ce8f072a354e2125c788f0PLAN_DE_GESTION_web.pdf

- Magazine Environnement

<https://fr.calameo.com/read/001500395498d253f7a32>

- Protocole des PME Ariane, Soyouz et Vega

http://www.cnes-csg.fr/automne_modules_files/standard/public/p10257_cd9a6eb76bfe239f7b17d1a0f46301af2016-228_Plans_de_mesures_environnement_A5-VV-VS.pdf