



**Remise des prix aux élèves méritants des écoles ISAE (Masters et SUPAERO), ENAC et ENSEEIHT**

Page 2

## ERTS 2020



Page 3

## EDITO

Chers Amis du Groupe Régional Midi-Pyrénées de la 3AF, A l'orée de l'année 2020, permettez-moi comme la tradition m'y autorise, de vous présenter tous mes vœux de bonheur et de santé à vous et à vos proches. Que cette nouvelle année soit pour vous, synonyme de perspectives fructueuses dans le cadre de vos activités, et que ces réalisations soient de nature à répondre à vos besoins et attentes.

Je souhaite que nos activités communes soient de nature à inciter des personnes extérieures à se joindre à nous, pour le bénéfice global de notre « Société savante ».

Nos activités à venir :

- Nous avons concocté un programme extrêmement riche et fourni, de conférences dont les sujets sont partagés entre l'Espace et l'Aéronautique.
- Fin Janvier aura lieu ERTS2020, le dixième du genre, nous espérons une fréquentation importante, digne de l'événement.
- Fin Mai, comme chaque année, notre GR sera partenaire de l'édition 2020 de « Air Expo », lieu incontournable des amoureux de l'avion avec ses différentes présentations en vol.
- Il ne faut pas oublier les activités très suivies de nos Commissions Techniques, hébergées à Toulouse (Aviation Commerciale, Exploration & Observation spatiales, Aviation légère) dont les publications sont attendues cette année plus que jamais.
- Nos Groupes de Travail sont ouverts à tous ceux qui voudraient donner un peu de leur temps au bénéfice de notre Association, en particulier le GT « Patrimoine » riche de ses souvenirs historiques.



**TARANIS**  
La face cachée des orages.

Page 6

**Un nouveau regard sur la mission de retour d'échantillon Vénusien**



Page 12

**Comment le Transport Aérien répondra aux besoins de l'Humanité**

Page 24



**Destination Espace**

Page 27

- L'espérance de la troisième session de notre forum « étudiants » en Décembre prochain, sera l'occasion donnée à nos jeunes de venir s'exprimer sur le devenir du Transport aérien.
- Enfin, toutes les manifestations communes où nous nous retrouverons avec convivialité et amitié, dans le but de promouvoir l'Aéronautique et le Spatial.

L'année 2019 a été très riche en événements : je veux citer le congrès MEA en Janvier 16 conférences réalisées certaines en partenariat avec l'AAE, la Cité de l'Espace, ...), le congrès ETTC 2019, au succès toujours renouvelé et enfin toutes ces manifestations avec nos jeunes afin d'assurer une présence forte auprès de ceux qui demain, je l'espère seront nos successeurs. Notre dernier trimestre a vu aussi nos remises traditionnelles de prix aux élèves de nos grandes écoles : voir plus loin dans notre gazette.

**Hommage à André Remondière**



Page 29

## Nota Bene :

La fusion des deux commissions techniques EOS (Exploration et Observation Spatiale) et Transport Spatial a donné la création de la Commission Technique ESPACE.

Nous développerons dans les mois qui viennent notre site personnalisé du GR MP, pour une meilleure lisibilité, preuve de notre volonté affichée de développer la communication entre les adhérents de notre région. Notre site nous servira j'en suis sûr à étoffer notre réseau d'adhérents, afin d'être davantage au service de chacun intéressé dans les domaines Aéronautiques et Spatiaux.

Être membre d'une Association, c'est par définition s'associer aux activités du groupe.

Notre vie est dans le partage des activités communes.

Francis Guimera

## Remise des prix aux élèves méritants des écoles ISAE (Masters et SUPAERO), ENAC et ENSEEIHT

Francis Guimera

Le quatrième trimestre 2019 a été l'occasion comme le veut la tradition, de remettre un certain nombre de prix 3AF-MP, à l'occasion des remises de diplôme aux élèves sortants des écoles ISAE-Masters, N7, ENAC et finalement ISAE-SUPAERO.

Traditionnellement ces remises ont été toujours l'occasion pour le bureau 3AF-MP de s'associer à ces événements comme une incitation naturelle pour ces jeunes, à créer, à innover, à être d'une compétence reconnue dans le monde de l'aérien et du spatial.

L'Aéronautique et l'Espace suscitent toujours autant de passion et fascination auprès du grand public. De nouveaux enjeux émergent de nouvelles façons de se déplacer dans l'aérien, de même que l'espace s'ouvre de plus en plus à l'univers. Ceci supporte, il ne faut pas en douter, notre présence dans ces moments-là.

Ainsi les prix suivants ont été délivrés :

- L'ENSEEIHT par Sandrine Basa Rolland à Thomas Astoul, qui a su sublimer le rôle essentiel des élèves de cette école dans la réalisation des systèmes avions installés ou à installer dans nos avions, sur nos transports spatiaux.



- l'ISAE Masters à Adrien Diasribeiro par Francis Guimera : un prix pour un diplômé français, ayant fait preuve de pugnacité dans ses études ainsi que de pertinence dans ses réflexions. Embauché récemment à l'ESA ayant refusé une embauche à la NASA.

- L'ENAC à Pierre DIEUMEGARD, IENAC16 AVI (par Yves Roncin) remerciant un jeune diplômé qui a su se faire reconnaître par son corps professoral, major de sa promo les 3 années ENAC, a eu les félicitations pour son stage ENAC

/ Airbus hélicoptère Marignane qui l'a embauché, il fut aussi président de l'asso Junior entreprise Envol de l'ENAC.



- l'ISAE-SUPAERO à Théo Masurier, par Francis Guimera, nouvellement embauché chez Airbus Hélicoptères, une présence et une clarté d'esprit reconnus lors du premier forum 3AF-MP « étudiants ».



A tous ces jeunes, nous ne pouvons que les féliciter encore et leur souhaiter de s'intégrer facilement dans les équipes professionnelles tout en leur souhaitant une évolution de carrière avantageuse.

Par ces remises modestes de prix, la 3AF-MP a voulu honorer ceux qui nous l'espérons seront nos successeurs de demain.



## Toulouse : dixième congrès européen (ERTS) sur les systèmes embarqués en temps réel

La dixième édition d'ERTS (Embedded Real Time Software), le congrès international des systèmes embarqués pour applications temps-réel critiques, s'est tenu à Toulouse du 29 au 31 janvier 2020.

Au programme : le développement de systèmes de plus en plus complexes, plus connectés et évoluant vers toujours plus d'autonomie.

Organisé tous les deux ans, le Congrès ERTS est un événement unique en Europe, un événement de référence dans le secteur des systèmes embarqués et des logiciels pour les universités, les centres de recherche et l'industrie.

Organisé par la 3AF Midi-Pyrénées (Association aéronautique et astronautique de France) et la SEE (Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication), le Congrès ERTS s'est tenu au Palais des congrès Pierre Baudis à Toulouse.

« Ce fut l'occasion de faire le point sur l'état de l'art, mais aussi de réunir industriels et chercheurs pour échanger et jeter les bases de nouvelles collaborations », ont exposé les organisateurs de cette dixième édition.

En introduction, **Louis Claude Vrignaud**, (directeur des partenariats public-privé pour la France chez Continental) en tant que « Monsieur loyal » a tenu à honorer cette 10<sup>ème</sup> édition avec un hommage appuyé à Jean Claude Laprie, premier président de comité scientifique, disparu depuis. A ce propos, trois prix spéciaux ont été remis lors du dîner de gala à des participants de la première heure, à savoir les présidents de Adacore, Qa Systems, et à Jean Paul Blanquart, l'homme clé des ERTS passés.



Hubert Monthubert (Conseil Régional), Jean Claude Dardelet (Toulouse Metropole), Jean Paul Porret (SEE) et Francis Guimera (3AF) ont procédé aux allocutions d'usage, représentant leurs entités propres.

Pour sa «10<sup>ème</sup> édition», le Congrès ERTS fut un « lieu d'être » pour les acteurs des universités, des centres de recherche et des industries :

- Aucun autre événement n'a ce mélange particulier de représentants scientifiques et industriels, agissant dans plusieurs domaines,
- La moitié des 60 membres du comité de programme représente tous les domaines où les systèmes embarqués sont centraux, y compris :
  - o -transport : aéronautique, automobile, ferroviaire, métro et maritime
  - o -exploration par satellite et spatiale
  - o -e-soins de santé
  - o -agriculture intelligente
  - o -industrie

- -énergie de défense
- -domaines télécoms

Ce congrès a été complété par une exposition spécialisée : une sélection de prestataires d'outils, PME spécialisées dans le développement et l'intégration de systèmes embarqués dédiés à vos besoins exacts : 56 stands.

Ce fut une occasion unique d'en apprendre davantage sur les derniers progrès et perspectives de ce secteur en constante évolution vers plus d'autonomie, de connectivité et d'intelligence artificielle.



Comme dans chacune des éditions précédentes, ce nouvel événement scientifique a été supporté par une soixantaine d'articles présentée par près de 300 chercheurs internationaux.

Véritable lieu de rencontre entre professionnels et scientifiques, les participants de ce 10<sup>ème</sup> Congrès proviennent d'instituts de recherche, de l'aérospatiale, de l'automobile mais aussi du nucléaire et du ferroviaire. Cette année, l'accent fut mis sur la sécurité et l'ingénierie des systèmes, ainsi que sur les méthodes formelles, les plates-formes multi cœurs et la certification.

Ayant participé à l'organisation du Congrès international de l'ERTS pendant de nombreuses années, **Jean Arlat** (ci-contre) a présidé le Comité de programme de cette 10<sup>ème</sup> conférence scientifique.

Lors d'un entretien, il a abordé les temps forts de l'ERTS 2020 et a dévoilé les principaux sujets scientifiques qui ont été présentés :

« Ce congrès se fonde sur le savoir-faire et l'histoire de la région Occitanie en ingénierie et en systèmes embarqués. Il traite des domaines de l'avionique, de l'espace et de l'automobile qui sont au cœur de cette activité. Mais elle va bien au-delà, car aujourd'hui ce congrès s'attaque à des domaines d'application de plus en plus vastes comme les chemins de fer, la santé et l'agriculture.

Cette manifestation s'appuie sur les acteurs de notre tissu industriel qui se développe localement depuis longtemps. Elle résulte de fortes collaborations - souvent construites grâce à des laboratoires communs - entre les chercheurs du CNRS et de l'Université de Toulouse et des entreprises comme Airbus, Continental, Thales.

L'IRT Saint Exupéry est également un important facilitateur de cette collaboration. Ce congrès est donc un événement international unique à la croisée de la recherche universitaire et de la recherche d'entreprise.

Cette année, parmi les 105 papiers reçus en réponse à l'appel de communication, le Comité du programme a sélectionné 56 contributions qui ont été présentées ainsi que 11 en tant que « posters ».

ERTS 2020 a abordé aussi le thème des propriétés dites « non fonctionnelles » essentielles à la qualité des services fournis. Il s'agit de la fiabilité et de la résilience des systèmes : c'est-à-dire d'anticiper et/ou de détecter les conséquences d'éventuelles erreurs et modifications du système intégré afin de minimiser les risques de défaillance.

L'autre défi consiste à garantir que le système traitera l'information strictement dans les délais impartis. Cette année, l'événement a mis en évidence les services émergents des systèmes embarqués à forte intensité logicielle et leurs capacités de communication croissantes. En effet, les technologies informatiques et numériques se déploient dans de nombreux domaines d'application.

Cela génère une grande quantité de données à gérer ; on l'appelle « Internet des objets » ou « Cyber-Physical Systems ». La montée en puissance de l'IA et la généralisation de la connectivité se sont retrouvées naturellement dans le congrès.

« Si les premières éditions d'ERTS étaient principalement dédiées à la sûreté de fonctionnement informatique, on constate une évolution autour du déploiement de systèmes de plus en plus autonomes et connectés », a témoigné **Jean Arlat**.

Le Conseil européen de l'innovation a été présenté par **Jean David Malo** de la Communauté européenne pour la recherche et l'innovation. Cette initiative, lancée au printemps 2019, vise à transformer les succès de la recherche fondamentale en entreprises et produits innovants.

**Marta Kwiatkowska** (chercheuse de premier plan en systèmes informatiques à Trinity Université d'Oxford) s'est exprimée sur l'apprentissage profond qui est nécessaire dans les applications, en particulier dans *les réseaux neuronaux qui sont des objets très complexes et où il y a encore beaucoup de travail à faire en ce qui concerne les méthodes de vérification et de validation des mécanismes d'apprentissage* » Une étape de simulation est en effet essentielle pour valider et évaluer le niveau de sécurité de ces produits et doit être obligatoire. Il est également important que cette phase de test soit effectuée par une entité indépendante, car nous ne les concepteurs eux-mêmes ne peuvent pas prendre du recul et voir la vue d'ensemble.



**Marc Mortureux**, le général manager de la PFA (Plateforme Nationale De l'Automobile et de la Mobilité, une association professionnelle qui regroupe les constructeurs automobiles et équipementiers, ainsi que tous les fournisseurs de l'industrie automobile et son écosystème d'innovation : environ 4000 entreprises en France et 400.000 salariés), expliqua que la PFA vise à partager une vision commune de l'avenir de notre industrie, à identifier les principaux défis à relever et à élaborer et à mettre en œuvre des plans d'action d'une manière collective pour réussir dans les transformations dramatiques que nous devons réaliser. L'intervention vise à illustrer les grands défis auxquels l'industrie automobile doit faire face. En fait, l'industrie automobile est frappée par trois perturbations majeures : - la

transition écologique, avec le moteur électrique, et un changement dans le mix énergétique qui aura des impacts majeurs sur l'industrie. - la révolution numérique, avec le véhicule intelligent, connecté et autonome, et le développement de nouveaux services de mobilité - la perturbation sociétale, avec un changement profond dans la relation avec la voiture. Il mis l'accent sur l'importance croissante des systèmes intégrés en temps réel dans les grands développements technologiques et fonctionnels du véhicule de l'avenir.

### **Des enjeux communs à l'auto et l'aéro**

« L'ERTS a l'avantage de favoriser les passerelles entre les filières, qui partagent les problématiques et les enjeux de systèmes embarqués. « *Pour mettre en œuvre des systèmes d'assistance au pilotage, l'aéronautique et l'automobile ont les mêmes challenges à relever* », insistent de concert **Charles Champion**, ancien vice-président exécutif en charge de l'engineering et R&D pour l'aviation commerciale chez Airbus et **Alexandre Corjon**, vice-président électrique, électronique et systèmes au sein de l'alliance Renault-Nissan. » a écrit aussi **Marina Angel** Journaliste à l'IT industrie et Technologie.

« *Avec le développement de véhicules de plus en plus connectés et autonomes, la question de la résilience des systèmes embarqués, leur capacité à tolérer et à rectifier des erreurs dues à des fautes ou à des malveillances, est devenu un enjeu majeur* », a aussi souligné **Louis-Claude Vrignaud**.

=====

En résumé, cette 10<sup>ème</sup> édition a bien atteint son objectif d'événement incontournable des systèmes embarqués, soulignant avec précision les aspects essentiels à considérer quand on s'intéresse aux logiciels qu'ils soient embarqués sur nos avions ou bien sur nos véhicules terrestres.

D'une manière générale, les participants ont reconnu l'avancée technologique telle que présentée et adhèrent sans réserve au prochain congrès annoncé en Février 2022.

=====

# TARANIS

## La face cachée des orages.

Christophe Bastien Thiry, Nicolas Pillet (CNES)



La salle VEGA de la cité de l'espace était pleine à craquer ce 25 novembre à la cité de l'espace, avec une assistance composée pour moitié d'étudiants ! Une mobilisation justifiée par l'intéressante conférence sur la mission TARANIS, avec deux intervenants passionnés : Christophe Bastien Thiry, chef de projet TARANIS au CNES et Jean Louis Pinçon, responsable scientifique de la mission au CNRS-LPC2E.

Il faut dire que cette mission spatiale, qui va prendre son envol mi 2020, n'est pas des plus banales puisqu'il s'agit de regarder, depuis un microsatellite à 670 km d'altitude, les phénomènes lumineux qui ont lieu, lors des orages, entre 20 et 100 km d'altitude.

Le satellite TARANIS est basé sur la Plate-forme Myriade, filière développée par le CNES, dans les années 2000, de la classe 100 – 200 kg / 1M3. A ce jour une vingtaine de satellites de cette classe sont en orbite, notamment pour des missions scientifiques.

Le projet TARANIS est réalisé en maîtrise d'œuvre interne au CNES Toulouse qui approvisionne donc les équipements ou sous systèmes et est en charge de l'intégration de la plate-forme et des instruments scientifiques ainsi que des essais satellites. Christophe Bastien Thiry nous a montré qu'une telle mission était une entreprise de longue haleine, puisque les premières études sur TARANIS ont débuté en 2005, soit 15 avant le lancement prévu en 2020 ! Un des gros chantiers de l'équipe projet du CNES a été de pouvoir coordonner les participations scientifiques et d'aménager, au 'chaussé pied', les 8 instruments scientifiques dans les contraintes imparties pour cette Plate-forme Myriade

TARANIS a récemment passé avec succès les essais dits 'essais satellites' : Comptabilité électromagnétique, vide thermique, vibrations, dé-gerbage du générateur solaire ... Essais qui permettent de vérifier que le satellite supportera les charges lors du lancement et de s'assurer de son bon fonctionnement dans l'environnement spatial. Bientôt il va être envoyé à Kourou où il devrait être lancé par un lanceur VEGA Mi 2020. Souhaitons-lui bonne chance !

### *Un peu de science autour des TLE*

#### **Étranges Phénomènes Lumineux et Bouffées de Rayons Gamma Observés Au-dessus des Orages**

*Auteurs : Jean-Louis Pinçon et Sébastien Célestin (LPC2E, Université d'Orléans, CNRS, Orléans, France).*

#### **Résumé**

Depuis le début des années 90, on sait que l'atmosphère au-dessus des orages est le lieu de phénomènes lumineux regroupés sous le terme générique de Transient Luminous Events (TLE) et de bouffées de photons de haute énergie appelées Terrestrial Gamma-ray Flashes (TGF). La découverte tardive de ces phénomènes a mis en évidence les limites de notre compréhension des processus physiques et chimiques se produisant dans l'atmosphère au-dessus des zones orageuses. Afin de répondre aux nombreuses questions en suspens sur les mécanismes à l'origine de ces phénomènes et sur leurs impacts sur la physico-chimie de la haute atmosphère, le satellite TARANIS du CNES, dédié à l'étude des TLE

et TGF, sera lancé sur une orbite basse en 2018. Les nouvelles observations ainsi obtenues, combinées à celles des réseaux d'observations au sol, pourront être comparées aux prédictions issues des modèles théoriques.

### La découverte des TLE

La première observation documentée d'un TLE date de 1989 [Franz et al., 1990]. Afin de tester la sensibilité d'un nouveau modèle de caméra conçu pour équiper une fusée sonde, une équipe de recherche de l'Université du Minnesota (Etats-Unis) décide de viser de nuit une étoile de luminosité bien connue. Or, cette nuit-là, à partir du poste d'observation choisi par l'équipe, l'étoile visée se trouve être juste au-dessus d'un orage distant. De retour au laboratoire l'équipe a la surprise de découvrir que les images prises par la caméra mettent en évidence d'étranges flashes lumineux localisés au-dessus de l'orage. Il s'agit de la première image d'un Sprite. Cette découverte fait grand bruit et marque le début d'une chasse aux phénomènes lumineux au-dessus des nuages d'orages. Les découvertes se sont ensuite rapidement enchaînées et on sait maintenant qu'il existe toute une série de phénomènes lumineux distincts (différentes altitudes, différentes topologies, différentes durées) se produisant dans la très haute atmosphère entre le sommet des nuages d'orage et l'ionosphère. Ces phénomènes lumineux, qui ont en commun d'être très brefs, sont regroupés sous le terme générique de TLE (Transient Luminous Events en anglais). Les nombreuses observations collectées ces dernières années montrent que, contrairement à ce que l'on supposait initialement, il s'agit de phénomènes fréquents pouvant se produire à toutes les latitudes et dépendant principalement de la seule existence d'une activité orageuse significative [Chen et al., 2008].

### Les caractéristiques des TLE

Les principaux types de TLE répertoriés à ce jour sont les Elves, les Sprites et les Jets (Blue Jets et Gigantic Jets). Ils sont représentés sur la Figure 1.

Les Elves se présentent sous la forme d'un anneau lumineux en extension rapide, centré au-dessus d'un éclair appelé « éclair parent » et se propagent à la frontière inférieure de l'ionosphère soit environ 90 km d'altitude. Ils ne durent typiquement qu'une milliseconde ce qui fait que l'observation de ces phénomènes n'est possible qu'à l'aide d'une instrumentation adaptée. Ce sont les plus fréquents des TLE, les orages les plus actifs peuvent produire des centaines voire des milliers d'Elves en quelques heures [Newsome and Inan, 2010].

Les Sprites se produisent entre 40 et 90 km d'altitude et durent de quelques millisecondes à quelques dizaines de millisecondes. Les observations faites à l'aide de caméras ultra-rapides montrent qu'ils possèdent une structure filamentaire complexe composée d'éléments se propageant soit vers le bas (Columniform Sprite), soit simultanément vers le haut et le bas (Carrot Sprite). L'ensemble peut être ou non accompagné d'un halo. Typiquement un Sprite fait suite à l'apparition d'un puissant éclair nuage-sol entraînant l'évacuation brutale d'une grande quantité de charges électriques de la partie supérieure du nuage d'orage.

Les Jets sont initiés au niveau de la surface supérieure des nuages d'orage. Ils se propagent typiquement jusqu'à 40 ou 50 km d'altitude et la lumière émise est principalement bleue, d'où le nom de Jets bleus (Blue Jets). Exceptionnellement, les jets peuvent atteindre 80 à 90 km d'altitude, la lumière émise au-delà de 40 km d'altitude est alors principalement rouge et ils peuvent durer plusieurs centaines de millisecondes. Ces Jets géants (Gigantic Jets) sont particulièrement rares et on ne connaît jusqu'à présent que quelques dizaines de cas documentés.

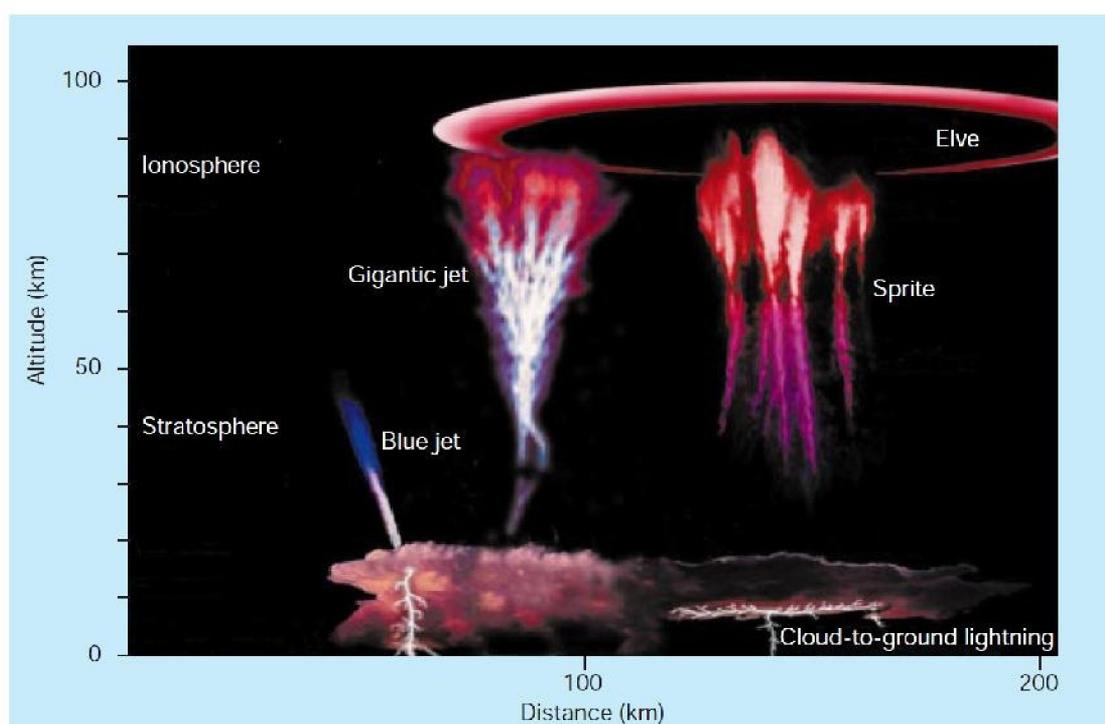


Figure 1. Vue d'artiste des TLE (crédit [Pasko, 2003], avec la permission de Nature)

Les différences d'altitude de génération, de topologie et de durée des TLE reflètent la diversité des mécanismes à l'origine de ces phénomènes bien qu'ils soient tous reliés aux décharges électriques se produisant dans les nuages d'orages. L'état de notre connaissance sur les mécanismes à l'origine des TLE dépend du type de TLE considéré. Nous avons une bonne compréhension des processus physiques à l'origine des Elves, la situation est déjà bien moins satisfaisante pour ce qui est des Sprites et la physique des Jets reste mal connue.

Le terme Elves est un acronyme pour **E**mission of **L**ight and **V**LF perturbation from an **EMP** Source [Fukunishi et al., 1996]. Lors d'un éclair nuage-sol une impulsion électromagnétique (EMP en anglais) est rayonnée radialement dans l'atmosphère principalement dans la bande VLF (3 kHz – 30 kHz). Les Elves sont la manifestation optique de l'interaction de cette EMP avec l'ionosphère. L'ionosphère s'étend entre environ 80 et 600 km d'altitude. Elle recouvre la partie supérieure de l'atmosphère pour laquelle les molécules sont ionisées par le rayonnement Ultra Violet solaire. Les électrons libres disponibles en abondance au voisinage de la frontière basse ionosphérique sont chauffés par l'EMP et entrent en collision avec les molécules neutres de l'ionosphère. Ces collisions produisent une ionisation des molécules et l'émission lumineuse observée. L'anneau lumineux en expansion rapide caractéristique des Elves est la signature de la propagation de l'EMP à la frontière basse de l'ionosphère. Les modélisations 3D actuellement disponibles [Marshall et al., 2009] reproduisent fidèlement toutes les propriétés des Elves observés.

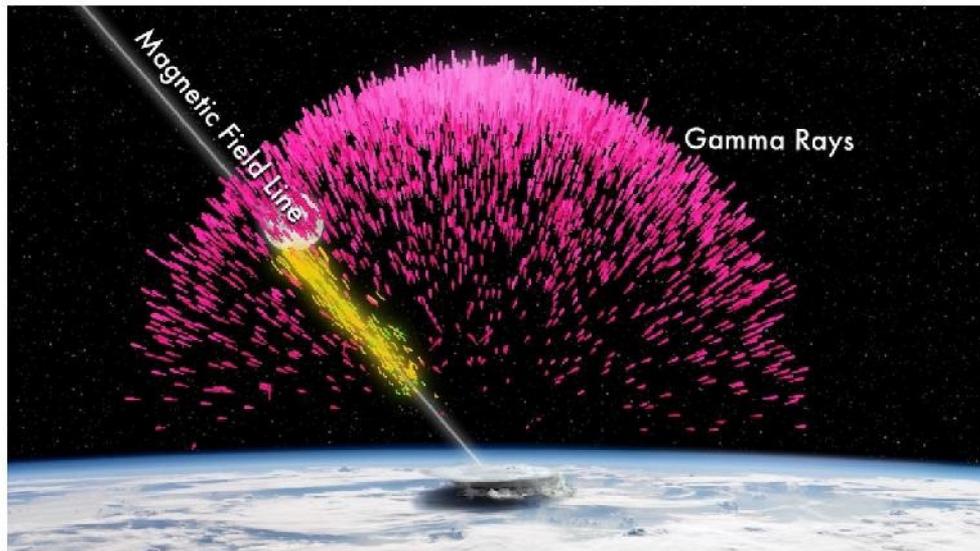
Les conditions nécessaires à la génération d'un Sprite sont maintenant assez bien comprises [Pasko et al., 1997]. En temps normal, les charges positives qui s'accumulent dans la partie supérieure du nuage d'orage ne génèrent pas de champ électrique notable dans la haute atmosphère car la mobilité des charges électriques dans les couches supérieures de l'atmosphère est suffisante pour neutraliser au fur et à mesure le champ électrique produit par la charge au sommet de l'orage. Toutefois, si un éclair se produit entre le sommet du nuage et le sol, une fraction importante de la charge positive peut être alors évacuée en quelques dizaines de microsecondes. Ce changement est bien trop rapide pour que les charges d'écrantage de la haute atmosphère puissent le compenser et, en conséquence, un fort champ électrique va pouvoir exister au-dessus du nuage d'orage pendant quelques dizaines de millisecondes. On montre alors que, si la variation de moment de charge par l'éclair parent (charge évacuée par l'éclair multipliée par la hauteur entre la zone de charge positive dans le nuage et le sol) est suffisante, le champ électrique résultant au-dessus de 70 km d'altitude pourra être supérieur au champ de claquage local de l'atmosphère. Les conditions sont réunies pour qu'un Sprite puisse se produire. Ce modèle est consistant avec les caractéristiques générales des Sprites (par exemple l'altitude de génération ou encore le lien avec la variation du moment de charge par l'éclair parent [Pasko et al., 2013]) mais il reste encore beaucoup à faire pour comprendre la structure filamentaire extrêmement complexe de ces phénomènes.

Les TLE sont des phénomènes relativement fréquents ce qui pose la question de leurs impacts sur la physico-chimie de la haute atmosphère. Des travaux récents [Gordillo-Vazquez, 2008, 2010], ainsi que des mesures sur la génération de NOx effectuées sur des décharges de laboratoires [Peterson et al., 2010], indiquent que la concentration locale de NOx dans la haute atmosphère pourrait être multipliée par un facteur 100 suite à la génération d'un Sprite. Ces travaux sont toutefois controversés et des données complémentaires sont nécessaires pour conclure sur ce point.

### La découverte des TGF

À bord de la navette spatiale Atlantis, la NASA lance en 1991 le *Compton Gamma-ray Observatory* (CGRO) dont le but est d'observer les sources célestes de rayons X et gamma. Il s'agit alors du deuxième satellite lancé dans le cadre du programme « Grands Observatoires » de la NASA, le premier étant le célèbre télescope Hubble. Depuis les années 60 et les satellites Vela lancés dans le cadre de la surveillance du respect du Traité d'Interdiction Partielle des Essais Nucléaires signé par l'URSS et les États-Unis, les scientifiques savent que l'univers est peuplé de phénomènes produisant des bouffées de rayons gamma appelés sursauts gamma. Aujourd'hui, on estime qu'ils sont liés à certains événements extrêmes tels que des supernovas formées par l'effondrement du cœur d'une étoile massive (sursauts longs : durée supérieure à deux secondes), et la collision d'étoiles à neutrons appartenant à un système binaire ou d'une étoile à neutrons et d'un trou noir (sursauts courts : durée inférieure à deux secondes et, généralement, de l'ordre du dixième de seconde).

Alors que CGRO poursuit sa mission nominale, les scientifiques en charge de l'instrument *Burst and Transient Source Experiment* (BATSE) à bord de CGRO découvrent que des bouffées de rayons gamma proviennent de la terre [Fishman et al., 1994]. Ces flashes gamma sont très brefs, très intenses, et ont un spectre en énergie très dur (rapport élevé entre le nombre de photons de haute énergie et le nombre de photons de plus basse énergie) qui est typique du rayonnement de freinage, ou *bremsstrahlung*, d'électrons dans l'atmosphère terrestre. De plus, ces émissions sont toujours observées lorsque des nuages d'orage sont présents en-dessous du satellite (voir Figure 2). Ces événements, appelés Terrestrial Gamma-ray Flashes (TGF), ont depuis été détectés par d'autres missions spatiales dédiées à l'étude des phénomènes astrophysiques de haute énergie : RHESSI (NASA), AGILE (Agence Spatiale Italienne, ASI), et Fermi (NASA).



**Figure 2** : Représentation de la production d'un TGF par un nuage d'orage terrestre et du faisceau d'électrons (points jaunes) et de positrons (points verts) associé confiné par le champ magnétique terrestre. Crédit : NASA - Goddard Space Flight Center/Joe Dwyer, Florida Inst. of Technology.

### Caractéristiques des TGF

On a d'abord pensé que les TGF étaient produits par des Sprites, eux-mêmes nouvellement découverts (voir ci-dessus), mais la comparaison entre des résultats de modèles et les observations de RHESSI ont permis de montrer que les TGF devaient être produits à des altitudes de l'ordre de 15 km [Dwyer et Smith, 2005], c'est à dire au niveau du sommet des orages tropicaux. Depuis, il a été montré que les TGF sont temporellement associés, à quelques microsecondes près, à l'initiation d'éclairs intra-nuages négatifs, qui sont les éclairs les plus communs.

Les TGF ont des durées beaucoup plus courtes que les sursauts gamma astronomiques. Les observations montrent qu'ils durent de 50  $\mu$ s à 1 ms, avec un maximum de distribution autour de 100  $\mu$ s. La fluence mesurée par les différents instruments à bord des satellites est un peu moins de 1 photon par centimètre carré. Toutefois, les instruments aujourd'hui capables de détecter les TGF saturent, ceux-ci ayant été conçus afin de mesurer les phénomènes gamma astronomiques sur des temps beaucoup plus longs. On ne connaît donc pas précisément la fluence maximale des TGF. Pour cette raison, l'instrument XGRE qui détectera les photons gamma à bord de TARANIS a été conçu pour être extrêmement rapide et donc peu affecté par les forts flux de photons. Il apportera donc des éléments nouveaux d'une très grande importance pour la compréhension des TGF. L'énergie maximum typiquement observée dans un TGF est de l'ordre de 20 MeV et est liée aux propriétés physiques de la source du TGF ainsi qu'à la position relative du satellite par rapport à la source. L'énergie minimum est de l'ordre de 20 keV et est due au fait que les photons de plus basse énergie sont absorbés dans l'atmosphère terrestre.

Grâce aux résultats des satellites AGILE et Fermi, ainsi que d'une ré-analyse des résultats de RHESSI, on sait maintenant que les TGF ne sont pas des événements rares. En effet, on estime que les TGF produits sur l'ensemble de la planète et potentiellement détectables par l'instrument Gamma ray Burst Monitor (GBM) à bord de Fermi, sont au nombre de 400 000 par an [Briggs et al., 2013]. Il s'agit là d'un minimum car les instruments opérationnels actuellement ne sont pas optimisés pour la détection des TGF et il n'est pas impossible qu'en fait tous les éclairs intra-nuages produisent des TGF [Østgaard et al., 2012]. Dans ce contexte, il est intéressant de noter qu'on estime que 30 éclairs intra-nuage se déclenchent par seconde à la surface du globe, soit environ 3 millions par jour.

### Les orages se comportent comme des accélérateurs de particules

L'observation de bouffées de rayons gamma comme produits du bremsstrahlung d'électrons énergétiques dans les orages était inattendue car il est difficile d'accélérer des particules dans un milieu dense tel que la troposphère terrestre à cause des multiples collisions avec les molécules de l'air. Par exemple, au moment où il est visible, un éclair est un plasma à l'équilibre thermique qui peut atteindre des températures de l'ordre de 10 000 °K. Cependant, dans ce système, les électrons sont thermalisés à cause de leurs collisions avec les molécules de l'air et ceux-ci ont finalement des énergies cinétiques guère supérieures à quelques électronvolts, c'est à dire de l'ordre de 10 millions de fois inférieures aux énergies requises pour produire un TGF. En fait, sous l'action d'un champ électrique, l'énergie gagnée par les électrons faiblement énergétiques est perdue dans les collisions qu'ils subissent. Il nous faut donc considérer que les processus qui génèrent les TGF produisent des électrons non-thermiques qui peuvent gagner des énergies très élevées (de l'ordre de la dizaine de MeV), ce sont les *électrons runaway* (voir encadré).

Deux théories permettent d'expliquer l'origine des TGF. La première est fondée sur l'avalanche d'électrons runaway relativistes (RREA) à partir d'électrons énergétiques préexistants. Des électrons de haute énergie (de l'ordre du MeV) sont en effet présents en permanence dans la troposphère à cause des rayons cosmiques qui bombardent l'atmosphère

terrestre. Si les champs électriques de grande échelle présents dans les orages sont suffisamment intenses, ces électrons runaway peuvent accélérer continûment (voir encadré). Lors de leur propagation, ces électrons peuvent ioniser les molécules d'air et produire des électrons secondaires. En de rares occasions, des électrons secondaires de haute énergie peuvent être produits et être eux-mêmes accélérés par le champ électrique de l'orage. Si la zone couverte par le champ est suffisamment étendue, une avalanche d'électrons runaway peut donc avoir lieu. C'est le bremsstrahlung associé à ces électrons qui constitue le TGF. En pratique, d'autres processus tels que l'effet photoélectrique, l'effet Compton et la production de paires électron-positron par les photons issus du bremsstrahlung dans la zone d'avalanche doivent être pris en compte. L'ensemble de ces processus secondaires peut former de nouvelles avalanches et ce mécanisme est appelé « feedback relativiste » [Dwyer et al., SSR, 2012].

La deuxième théorie est fondée sur la production d'électrons runaway thermiques directement par des éclairs intra-nuage. La propagation des éclairs est un processus extrêmement complexe. Les branches négatives d'un éclair ne se propagent pas de manière continue mais par pas successifs. On montre qu'à chaque pas est associée une bouffée de décharges couronnes peuplée de plasmas filamenteux qui ont la propriété remarquable de produire des champs électriques extrêmes en tête du filament. Sous certaines conditions, ces champs peuvent être suffisamment élevés pour produire des électrons runaway thermiques (voir encadré) lesquels peuvent être alors accélérés par le champ électrique de plus grande échelle de l'éclair. Le TGF est constitué du bremsstrahlung associé à ces électrons runaway. Notons que ce mécanisme permet également d'expliquer les bouffées de rayons X (de plus faible énergie que les TGF) produits par les éclairs nuage-sol et observés depuis le sol [Dwyer et al, SSR, 2012].

Bien que les RREA requièrent des champs électriques plus forts que ceux généralement observés dans les orages, les spectres des TGF prédits par cette théorie sont en excellent accord avec les observations. Les spectres prédits par la théorie associant les TGF aux éclairs intra-nuage sont aussi en bon accord avec les observations si la chute de potentiel en tête d'éclair est suffisamment grande, ce qui permet d'imposer des contraintes aux modèles. En outre, cette dernière théorie implique une connexion naturelle entre les TGF et les éclairs intra-nuage.

Découverts relativement récemment, les TGF comportent encore beaucoup d'inconnues. Les étudier nous permettra : de mieux connaître et modéliser l'électrification des orages, de mieux évaluer les risques sur les passagers à bord d'avions traversant les nuages d'orages [Dwyer et al, 2010], d'évaluer les effets des orages sur l'avionique [Tavani et al., 2013], d'améliorer notre compréhension de la propagation des éclairs et de leurs effets dans le système atmosphère-ionosphère-magnétosphère. Les TGF sont aussi associés à la production de faisceaux d'électrons et de positrons de haute énergie confinés par le champ magnétique terrestre (voir Figure 3) lesquels représentent une source non encore évaluée de particules énergétiques dans la magnétosphère.

#### **Encadré : Les électrons « runaway »**

Les électrons se propageant dans l'air avec des énergies élevées (généralement au-delà du keV) ont une probabilité très réduite de collision avec les molécules. En conséquence, sous l'action d'un champ électrique suffisamment fort (mais faible comparé au champ de claquage dans l'air), ils ont la propriété de gagner plus d'énergie du champ électrique qu'ils n'en perdent par collisions avec les molécules de l'air. Ces électrons qui ont la particularité d'accélérer continuellement dans un milieu dense tel que l'air et d'émettre du rayonnement dur (X ou gamma) par bremsstrahlung, sont appelés *électrons runaway* et sont à la base des théories sur l'origine des TGF. Il existe ainsi deux façons d'obtenir des électrons runaway : (1) le processus runaway relativiste pour lequel des électrons énergétiques préexistants accélèrent dans un champ électrique homogène ; (2) le processus runaway thermique pour lequel des champs électriques localement très intenses transforment des électrons de basse énergie (généralement thermalisés avec des énergies de l'ordre de l'électronvolt) en électrons runaway. L'amplitude du champ électrique nécessaire pour produire ce phénomène dans l'air à une pression de 1 atm est d'environ 260 kV/cm, soit près de 10 fois le champ de claquage (champ électrique au-dessus duquel l'air devient ionisé) dans les mêmes conditions. Seuls de très rares processus naturels produisent des champs électriques aussi intenses et les plasmas filamenteux associés à la propagation des éclairs dans les nuages en font partie.

#### **La mission spatiale TARANIS**

Depuis la découverte des TLE et TGF la compréhension des mécanismes physiques à l'origine de ces phénomènes a nettement progressé. Toutefois, les données disponibles à ce jour ne permettent pas toujours de trancher sans ambiguïté entre les différents processus de génération proposés. Ainsi, par exemple, le rayonnement gamma des TGF est absorbé par les couches denses de la basse atmosphère et ils ne peuvent être détectés qu'à partir de l'espace. Or les observations spatiales actuellement disponibles proviennent d'instruments dont les caractéristiques et les performances ne sont pas adaptées à la nature des TGF. Du fait de la barrière que constitue le nuage d'orage, les TLE ne peuvent être observés à partir du sol qu'à la condition de se trouver en hauteur et à une grande distance du foyer orageux. L'éloignement, combiné à l'absorption par les couches denses de la basse atmosphère, rend très difficile l'obtention de données pertinentes pour l'étude de la microphysique de ces phénomènes.

Cette situation devrait être résolue par le lancement, courant 2018, du satellite TARANIS dédié à l'étude des TLE et TGF. TARANIS fournira à la communauté scientifique des jeux de données à haute résolution mesurés depuis l'espace. L'instrumentation embarquée est spécifiquement conçue pour l'étude des TLE et TGF et comprend des caméras, des photomètres, un détecteur gamma, des détecteurs d'électrons énergétiques, ainsi que des capteurs électriques et magnétiques (voir Figure 3). De telles mesures combinées aux mesures sols sont requises pour : identifier et caractériser

toutes les signatures potentielles des TLE et TGF ; établir une connexion précise entre l'activité électrique de l'orage et la production des TLE et TGF ; résoudre les ambiguïtés actuelles sur les mécanismes de génération et quantifier les effets des TLE et TGF sur la physico-chimie de la haute atmosphère.

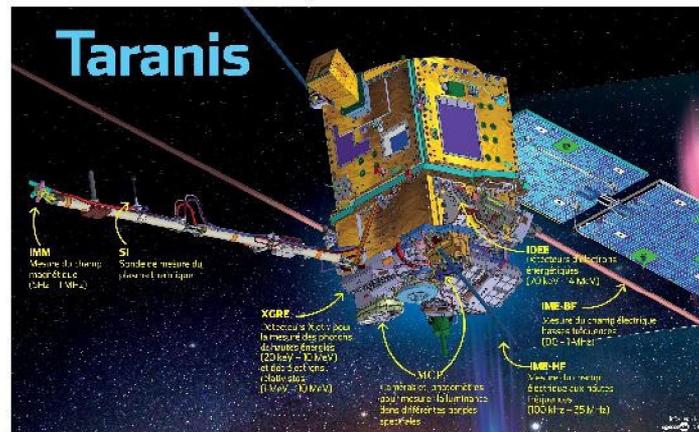


Figure 3 - Les instruments de la charge utile scientifique de TARANIS.

### Conclusion

L'étude des TLE et TGF et, plus généralement, les recherches sur l'électricité atmosphérique sont actuellement des domaines qui font l'objet d'une intense activité scientifique. A partir de 2020 les nouvelles informations sur les TLE et TGF provenant de la combinaison des observations au nadir de TARANIS avec les mesures des réseaux d'observations au sol devraient nous permettre d'obtenir des réponses aux nombreuses questions en suspens sur les mécanismes à l'origine de ces phénomènes et sur l'impact qu'ils pourraient avoir sur la physicochimie de la haute atmosphère.

### Références

- Briggs, M. S., et al. (2013), Terrestrial gamma-ray flashes in the Fermi era: Improved observations and analysis methods, *J. Geophys. Res.*, 118, 3805.
- Chen, A. B., et al. (2008), Global distributions and occurrence rates of transient luminous events, *J. Geophys. Res.*, 113, A08306, doi:10.1029/2008JA013101.
- Dwyer, J. R., and D. M. Smith (2005), A comparison between Monte Carlo simulations of runaway breakdown and terrestrial gamma-ray flash observations, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L22804.
- Dwyer, J. R., et al. (2010), Estimation of the fluence of high-energy electron bursts produced by thunderclouds and the resulting radiation doses received in aircraft, *J. Geophys. Res.*, 115, D09206.
- Dwyer, J. R., D. M. Smith, and S. A. Cummer (2012), High-Energy Atmospheric Physics: Terrestrial Gamma-Ray Flashes and Related Phenomena, *Space Sci. Rev.*, 173, 133.
- Fishman, G., et al. (1994), Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin, *Science*, 264, 1313.
- Franz, R. C., R. J. Nemzek, and J. R. Winckler. (1990), Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system. *Science*, 249, 48–51.
- Fukunishi, H., Y. Takahashi, M. Kubota, K. Sakanoi, U. S. Inan, and W. A. Lyons (1996), Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 2157–2160, doi:10.1029/96GL01979.
- Gordillo-Vazquez, F. J., Air plasma kinetics under the influence of sprites (2008), *J. Phys. D Appl. Phys.*, 41, 234016.1– 234016.33, doi:10.1088/0022-3727/41/23/234016.
- Gordillo-Vazquez, F. J., Vibrational kinetics of air plasmas induced by sprites (2010), *J. Geophys. Res.*, 115, A00E25, doi:10.1029/2009JA014688.
- Marshall, R. A., U. S. Inan, and V. S. Glukhov (2010), Elves and associated electron density changes due to cloud-to-ground and in-cloud lightning discharges, *J. Geophys. Res.*, 115, A00E17, doi:10.1029/2009JA014469.
- Newsome, R. T., and U. S. Inan (2010), Free-running ground-based photometric array imaging of transient luminous events, *J. Geophys. Res.*, A00E41, doi: 10.1029/2009JA014834.
- Peterson, H., M. Bailey, J. Hallett, and W. Beasley (2009), NO<sub>x</sub> production in laboratory discharges simulating blue jets and red sprites, *J. Geophys. Res.*, 114, A00E07, doi:10.1029/2009JA014489.
- Pasko, V. P., U. S. Inan, T. F. Bell, and Y. N. Taranenko (1997), Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 102(A3), 4529–4561.
- Pasko, V. P. (2003), Electric jets, *Nature*, 423, 927–929.
- Pasko V. P., Qin, J., and S. Celestin (2013), Toward Better Understanding of Sprite Streamers: Initiation, Morphology, and Polarity Asymmetry, *Surv. Geophys.*, 34, 797.
- Østgaard, N., T. Gjesteland, R. S. Hansen, A. B. Collier, and B. Carlson (2012), The true fluence distribution of terrestrial gamma flashes at satellite altitude, *J. Geophys. Res.*, 117, A03327.
- Tavani, M., et al. (2013), Possible effects on avionics induced by terrestrial gamma-ray flashes, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 1127.

## Un nouveau regard sur la mission de retour d'échantillon Vénusien

Dominique Valentian\*

Christophe Koppel

Philippe Mairet\*

Loup Mairet\*

\* Membres de la commission Espace de 3AF

1. Introduction
2. Caractéristiques de Venus
  - 2.1 La Planète
  - 2.2 Composition de l'atmosphère:
  - 2.3 Couches de nuages
  - 2.4 Modèle d'atmosphère
3. Conséquences
4. Analyse des travaux antérieurs
5. Profil de Mission proposé
6. Atterrisseur UAV
  - 6.1 Contrôle thermique de l'UAV
  - 6.2 Variante : récupération d'échantillon par deuxième ballon
  - 6.3 Configuration des UAV sous coiffe
7. Module ballon / lanceur
8. Module orbital de retour d'échantillon
9. Conclusion
10. Références

## 1. Introduction

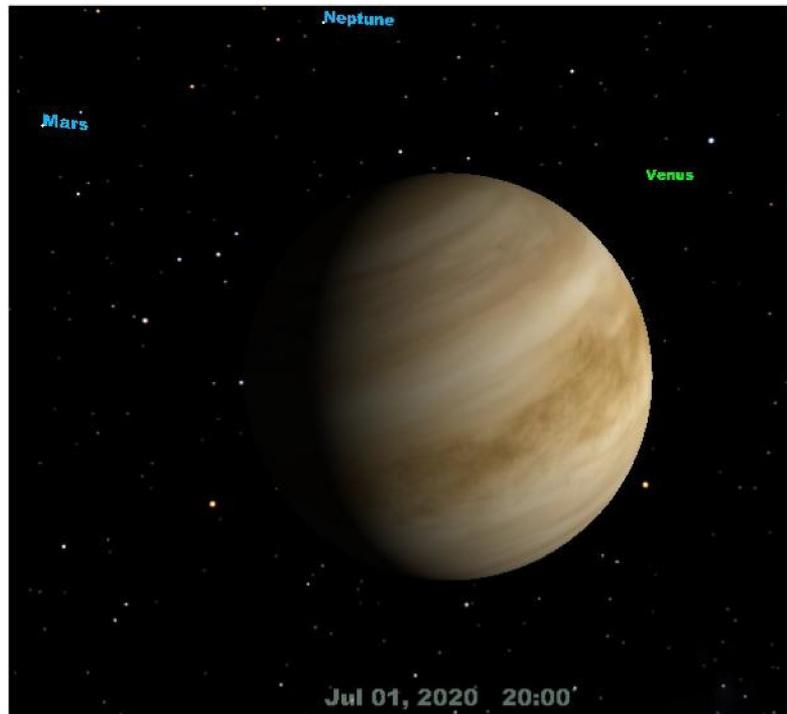
L'original de ce document a été écrit en anglais pour la consultation de l'ESA « Voyage 2050 » visant à susciter des suggestions pour le programme scientifique de l'agence pour la période 2035 – 2050.

La commission Espace a choisi de s'intéresser plus spécialement au retour d'échantillons vénusiens, un problème technique très difficile.

La composition de la surface du sol vénusien présente un très grand intérêt scientifique, et au-delà un intérêt sociétal pour comprendre comment deux planètes pratiquement jumelles, la Terre et Vénus, ont eu des évolutions aussi divergentes.

Cette mission comporte plusieurs points critiques :

- L'exposition à la chaleur à la pression de l'atmosphère vénusienne pendant le temps de prise d'échantillon.
- Un micro-lanceur est requis pour retourner le ou les échantillons en orbite basse. Ce micro-lanceur doit être soutenu par un ballon qu'il faut gonfler en moins de deux minutes.
- Un UAV « unmanned aerial vehicle » doit amener l'échantillon du sol vers le micro-lanceur. Cet UAV doit résister à la chaleur durant le vol.
- La précision de la trajectoire du micro-lanceur qui doit viser précisément le module en orbite vénusienne avant retour d'échantillons sur Terre.



Le propos de cette note est de montrer comment on peut minimiser les risques à chaque étape critique. Contrairement à d'autres projets l'utilisation de plusieurs lanceurs est admise afin de ne pas contraindre le budget de masse totale.

Cette mission appartient à la classe « L » (large) de la dénomination ESA soit une des trois missions majeures de chaque période de programmation.

## 2. Caractéristiques de Vénus

### 2.1 La Planète

Ce tableau présente les caractéristiques comparées de Vénus et de la Terre.

Paramètre	Venus	Earth	Ref.
Masse (kg)	4.869E+24	5.974E+24	[NSSDC]
Rayon Équatorial (km)	6051.8	6378.1	[NSSDC]
Densité (kg/m <sup>3</sup> )	5243	5515	[NSSDC]
Pesanteur à la Surface y g (m/s <sup>2</sup> )	8.87	9.78	[Allen99]
Vitesse de libération équatoriale (km/s)	10.36	11.18	[Allen99]

Jour solaire : 116 jours terrestres. Vitesse orbitale circulaire à 300 km = 7154 m/s.

### 2.2 Composition de l'atmosphère:

L'atmosphère est essentiellement formée de CO<sub>2</sub> (96.5%) et d'azote (3.5%).

### 2.3 Composition des couches de nuages

31 - 51 km	brume
51 - 52 km	zone claire
52 - 58 km	Gouttelettes d'acide (25% water)
58 - 68 km	cristaux de glace

### 2.4 Modèle d'atmosphère

Voici les valeurs de température et de pression prises dans l'étude :

Altitude (km)	T (°C)	P (bar)	D (kg/m <sup>3</sup> )	Vitesse du vent (m/s) avg (min - max)
70	-43	0.037		92 (62 - 124)
55	29	0.53	0.93128	60 (39 - 90)
50	77	1.1	1.6689	61 (38 - 80)

30	224	9.6	10.298	36 (22 – 49)
10	385	38		5 (-2 – 11)
0	462	92	66.381	0.5 (-1 – 1)

Aucune protection planétaire n'est nécessaire.

### 3. Conséquences

L'examen des tableaux conduit aux conclusions suivantes :

- L'altitude de départ du micro-lanceur doit être comprise entre 50 et 55 km. En dessous la température est trop élevée pour les propergols solides et les pertes aérodynamiques sont trop importantes. Au-dessus, l'altitude devient trop élevée pour l'UAV.
- Cette zone contient des nuages qui compliquent le rendez-vous optique. Il faut donc prévoir un rendez-vous RF.
- Le flux solaire à 50 km est suffisant pour le bon fonctionnement des panneaux solaires.
- L'altitude minimum pour gonfler un ballon conventionnel est de 30 km (température 224 °C convenable pour le Kapton®).
- La densité atmosphérique à la surface de Vénus est 40 fois plus forte que sur Terre. Il est beaucoup plus facile d'y faire décoller un UAV. La puissance requise est 7 fois plus faible.

### 4. Analyse des travaux antérieurs

La référence [1] fournit une analyse de mission très détaillée. La VAV (Venus Ascent Vehicle) une sorte de micro-lanceur, devait être lancé depuis 66 km d'altitude ; il était composé de trois étages à propulsion solide (STAR 24C, 17A et 13A) pour une masse totale au lancement de 476 kg et un Delta V de 8375 m/s vers une orbite circulaire de 300 km, de période 93 minutes. La charge utile était de 2 kg. Il aurait fallu effectuer des modifications majeures sur les propulseurs STAR, moteurs d'apogée de satellites à tuyère fixe, pour monter des tuyères sur butées flexibles. Les pertes par gravité, pertes aérodynamiques et par erreurs de pointage étaient comptées pour seulement 1220 m/s alors que la pratique pour les lanceurs est de 1500 m/s.

Le VAV était « protégé » des 460°C de la surface pour une atmosphère d'hélium, les auteurs reconnaissaient que c'était une solution marginale à cause de la forte conductibilité thermique de l'hélium.

Le VAV était soumis à une pression de 9.6 MPa ce qui aurait pu conduire au flambage de l'enveloppe des propulseurs solides.

La remontée lente sous le ballon (4 heures) pouvait aussi exposer le propergol solide à une température excessive (le propergol doit rester en dessous de 60°C).

Le ballon lui-même posait d'énormes problèmes : il fallait le gonfler rapidement à 9.6 MPa puis se dilater d'un facteur 1000 pour grimper à 66 km. C'est déjà difficile à Terre mais plus encore quand il y a aucune assistance et que l'enveloppe est soumise à 460°C. La matière proposée pour le ballon PBO (Polybenzoxazole) est disponible sous forme de fibres mais par sous forme de film comme le Kapton®.

Toutes ces contraintes s'expliquent par un budget de masse très contraint : 3 tonnes au lancement, fourni par un Delta 4 M avec un excès d'énergie au-delà de la vitesse de libération  $C3 = 9 \text{ km}^2/\text{s}^2$ .

La capture sur Vénus était fournie par un ballute « ballon-parachute » (vitesse 11,75 km/s). Approche risqué pour diminuer la masse du bouclier de 30 à 14% (les essais de ballute en orbite basse ont tous pratiquement échoués).

Dans un document récent [4] les auteurs ont proposé de mettre en œuvre un UAV pour amener l'échantillon du sol vers un ballon à 55 km d'altitude soutenant le micro-lanceur.

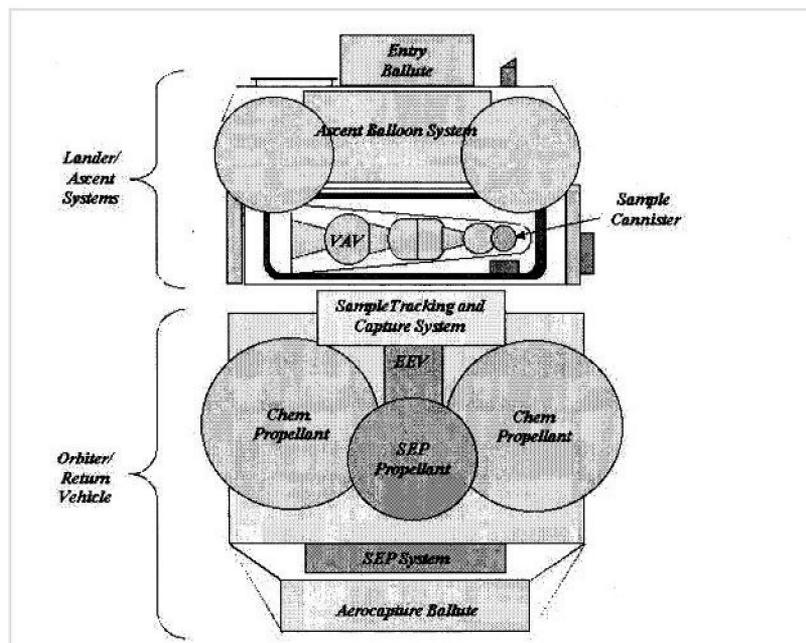


Figure 1 launch configuration for the Venus Surface Sample Return system. The Venus ascent vehicle (VAV) shown in the Landed Ascent systems is just under 3m long.

## 5. Profil de Mission proposé

La mission prévoit quatre types de véhicules :

- Un orbiteur, qui contient le corps de rentrée des échantillons et le module de propulsion Vénus – Terre.
- Un système ballon / micro-lanceur dérivant à 55 km d'altitude et devant récupérer les différents échantillons avant rendez-vous avec l'orbiteur.
- Un module interplanétaire supportant plusieurs atterrisseurs, chacun muni d'un bouclier et comprenant un UAV chargé de retourner les échantillons vers le système ballon / micro-lanceur.
- Au moins deux petites sondes en orbite circulaire autour de Vénus, servant de relais de communication et de moyen de navigation pour l'orbiteur, le système ballon / micro-lanceur et pour les UAV.

Il faut au moins deux lanceurs et de préférence trois pour les différents modules :

- Le système ballon / micro-lanceur requiert un lanceur type Ariane 64.
- Un deuxième lanceur emporte les trois atterrisseurs et un module de propulsion commun.
- Le troisième lanceur l'orbiteur et les deux petites sondes.

L'avantage supplémentaire de la solution à trois lanceurs est de permettre une coopération internationale (hors Europe)

Les lancements peuvent avoir lieu à plusieurs mois d'intervalle.

Les trois modules : système ballon / micro-lanceur, module de propulsion et atterrisseurs et orbiteur plus petites sondes, utilisent la même technique d'insertion : après une croisière de plusieurs mois, une impulsion chimique près de Vénus permet une capture sur une orbite très elliptique équatoriale. Cette orbite est circularisée en propulsion électrique. Cette opération prend du temps (presque un an) mais elle permet une vitesse de rentrée très modérée 7,5 km/s une accélération faible, moins de 5 g, à comparer aux 11,5 km/s et 200 g d'une rentrée hyperbolique. Les trois modules sont situés sur une orbite circulaire équatoriale, ce choix est fait en fonction des vents à haute altitude qui sont prévisibles uniquement dans la zone équatoriale.

Le profil de mission après la collecte d'échantillons est le suivant :

Chaque UAV décolle pour effectuer un rendez-vous avec le système ballon / micro-lanceur. Ce dernier dérive dans les vents équatoriaux à 216 km/h. En admettant que le vol dure une heure, il faut déclencher le décollage de l'UAV alors que le système est à 216 km du point de rendez-vous. Les liaisons RF peuvent avoir lieu dans un rayon de 818 km, largement suffisant pour l'ensemble du rendez-vous.

Les échantillons sont alors insérés dans la capsule de l'orbiter.

Ce dernier est alors transféré en propulsion électrique sur une orbite elliptique avant impulsion chimique au périastre en direction de la Terre.

## 6. Atterrisseur UAV

La version nominale met en œuvre un UAV qui, après récupération des échantillons, décolle verticalement de la surface de Vénus, poursuit son vol en configuration avion et effectue un rendez-vous avec le système ballon / micro-lanceur.

L'atterrisseur peut être utilisé pour analyser le profil d'atmosphère au cours de la descente. L'instrumentation peut comprendre : capteurs de température, de pression, de turbulence, de vitesse et direction du vent (effet doppler), un néphélomètre et enfin d'imagerie du sol juste avant l'atterrissage.

### 6.1 Contrôle thermique de l'UAV

La question la plus difficile est la survie de l'atterrisseur dans une atmosphère à 460°C.

Deux solutions techniques ont été examinées :

- Double paroi sous vide et super Isolation.
- Isolation thermique à pression ambiante (9,2 MPa) et balayage par gaz neutre.

Dans les deux cas, le flux thermique est absorbé par un matériau à changement de phase.

L'objectif visé est de maintenir le fonctionnement de l'atterrisseur pendant 12 heures.

La performance des différents matériaux (température et chaleur latente de fusion) est rappelée dans le tableau suivant :

	T fusion		L fusion kJ / kg	Cp		Conductivité		Masse volumique	
	K	°C		kJ / kg K	W / m K	kg / m <sup>3</sup>			
				Solide	liquide	Solide	liquide	Solide	liquide
Li	452	179	420	3,30	3,3	71	43	530	
Na	370	97	115	1,23	1,3	135	85	970	
K	337	64	61	0,74	0,8	99	50	860	
H <sub>2</sub> O	273	0	334	2,1	4,18	2,3	0,6	912	1000

La glace d'eau est retenue. Elle est gelée en orbite à l'aide de la boucle fluide et d'un radiateur. Elle est contenue dans de petites capsules en plastique. Cette solution est utilisée dans l'industrie du froid. Entre -20 et +40°C on peut ainsi absorber 534 200 J/kg.

### Double paroi sous vide et super Isolation

Les calculs sont effectués dans le cas d'une sphère. On peut aussi partir d'une configuration cono-sphérique comme dans le cas du SSHeL d'Ariane 5. La figure 2 montre que l'on peut facilement intégrer ce volume dans un quad-copter. La figure 3 montre le quad-copter en vol type avion. Enfin, la figure 4 montre le concept de double paroi sous vide. La table ci-dessous donne la conductibilité thermique en fonction de la température.

Temperature (K)	360	490	600	733 *
Effective conductivity *10 <sup>6</sup> (W/cm.°C)	3	4,5	7	9,5

(\*) Cette valeur (733 K = 460°C) est extrapolée pour les besoins de l'étude.

Elle est extraite de la référence : Performance of multilayer insulation systems for the 300 to 800 K temperature range. E. R. Streed et Al. AIAA-65-663. AIAA Thermophysics Conference. September 13-15 1965.

La conductibilité est donnée par la formule (T, To en kelvin) :

$$\lambda \times 10^6 = 2.3 + 0.00045 (T - T_0) + 0.5 (T^{2.5} - T_0^{2.5})/T_0^{2.5}$$

Pour un superisolant formé de 30 couches et épais de 1,27 cm le flux est de 33.4 W/m<sup>2</sup> entre 733 et 286 K.

Ces valeurs sont aussi vérifiées par les essais effectués par Snecma sur le superisolant de fours spatiaux.

La table ci-dessous donne les résultats pour des sphères de 0,5 et 1 m de diamètre. Comme prévu la durée de fonctionnement de la sphère de 1 m est deux fois plus grand (75 heures contre 37,5h pour la petite).

Sphere diameter	m	1	0,5	Cp water	J/kg.K	4180	4180
Sphere surface	m <sup>2</sup>	3,142	0,785	Ti		-20	-20
Radiative Flux	W/m <sup>2</sup>	33,4	33,4	Tf		40	40
Radiative heating	W	104,929	26,232	Heat capacity	J/kg	543200	543200
Conductive losses	W	100	25	Sphere volume	m <sup>3</sup>	0,5236	0,0654
Heating power	W	204,929	51,232	PCM mass percentage	Kg/m <sup>3</sup>	100	100
Phase change material				PCM mass	kg	52,360	6,545
Cp ice	J/kg.K	2100	2100	Heat storage	J	28441885	3555235,69
L	J/kg	334000	334000	Duration	s	271057,9	135528,94
					hour	75,29	37,65

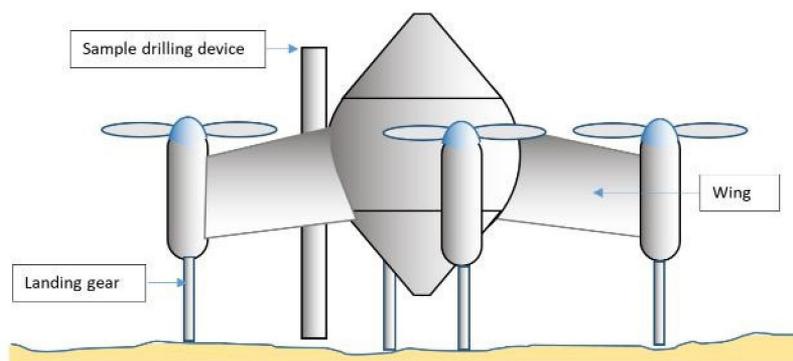


Figure 2: UAV Aerodynamic integration

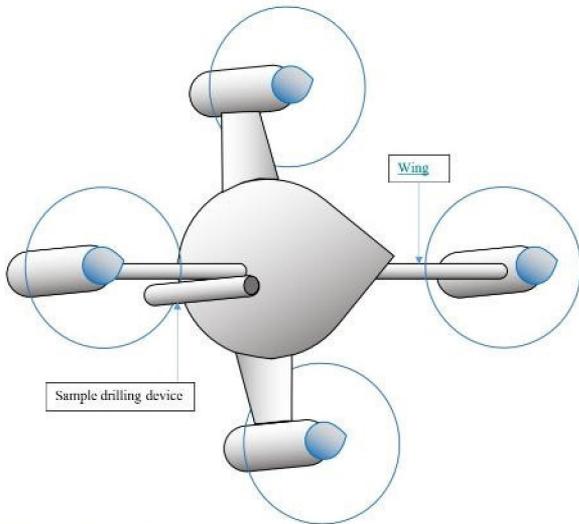


Figure 3: Inflight (cruise) configuration

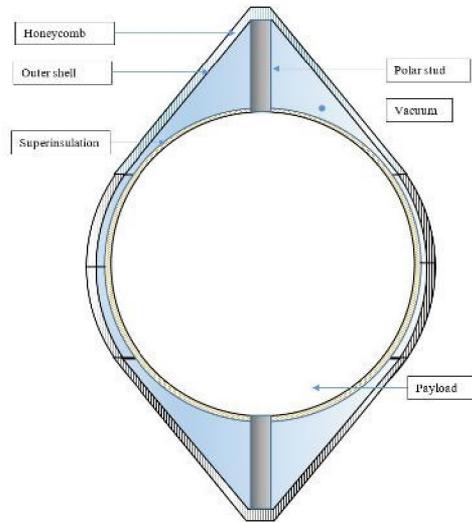


Figure 4: Evacuated thermal insulation concept.

La masse du PCM est calculée en prenant 10% du volume utile et une densité de 1.

La durée de vie réelle sera plus basse en raison de la dissipation des batteries, de l'électronique et –éventuellement – du refroidissement des moteurs.

La structure externe inclut un nid d'abeilles pour améliorer la résistance au flambage ( $P = 9,2 \text{ MPa}$ ). Elle peut être soit en titane soit en carbure de silicium. Ce dernier offre une résistance en compression élevée 1000 MPa et une densité faible (2,5).

La figure 5 montre une configuration sphérique avec une bride équatoriale à faible conductibilité thermique.

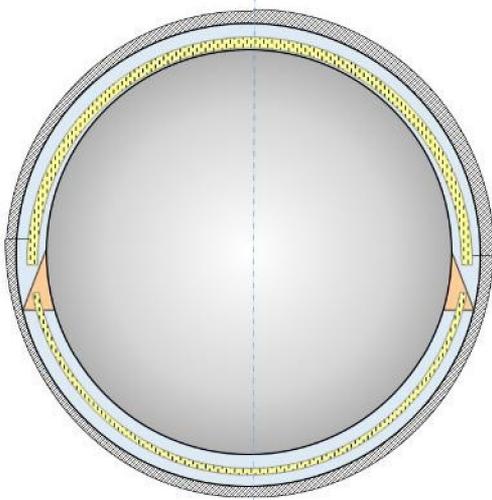


Figure 5: Alternate design with equatorial flange

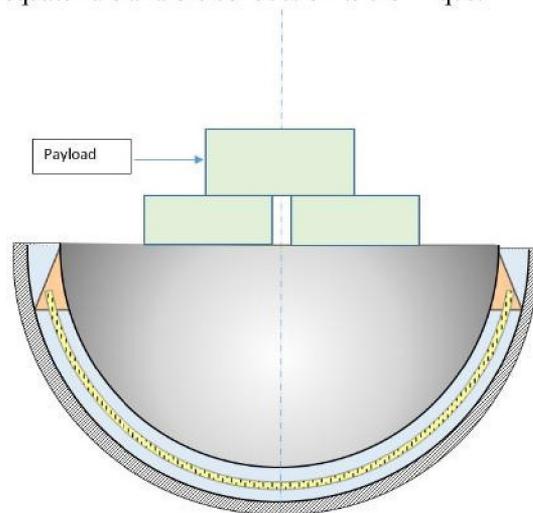


Figure 6 Step one of sphere closing

Les figures 6 à 8 montrent comment on monte la sphère externe. Après intégration de la charge utile, l'hémisphère interne supérieure est soudé au laser sur l'hémisphère inférieure. Le superisolant est mis en place et l'ensemble est monté dans une chambre à vide.

L'hémisphère externe supérieure est montée sous vide sur l'hémisphère inférieure et l'ensemble est brasé sous vide par chauffage local (faisceau d'électrons).

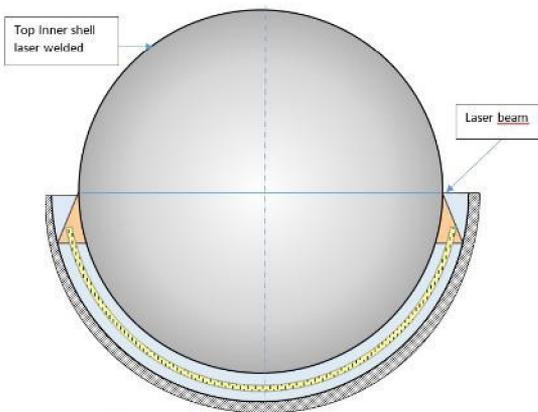


Figure 7 : Step 2 welding of the upper inner sphere

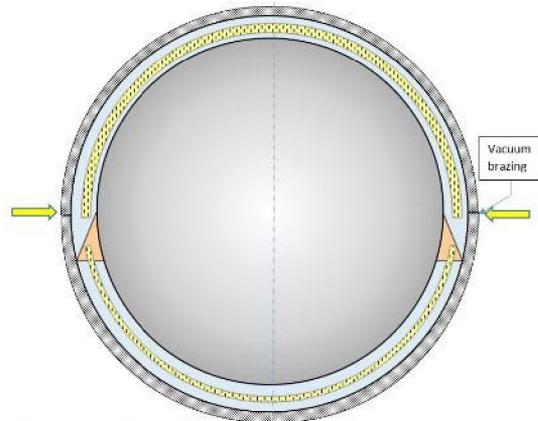


Figure 8: Step 3 Upper superinsulation and closing of the outer sphere by brazing under vacuum

### Isolation thermique sous pression ambiante

Cette disposition a deux avantages :

- La géométrie est peu contrainte
- La masse de la sphère résistant au flambage est éliminée.

Afin d'améliorer l'isolation thermique du milieu poreux, ce dernier est baigné par un gaz neutre, le xénon, dont la conductibilité thermique est très faible. Le milieu poreux est soit du Min-K® soit un aérogel de silice. Dans les deux cas, la conductibilité thermique est inférieure à celle de l'air.

Voici les propriétés physiques du xénon :

Température critique ( $T_c$ ) 289.733 K

Pression critique ( $P_c$ ) 5.8420 MPa

Densité critique ( $D_c$ ) 1100. kg/m<sup>3</sup>

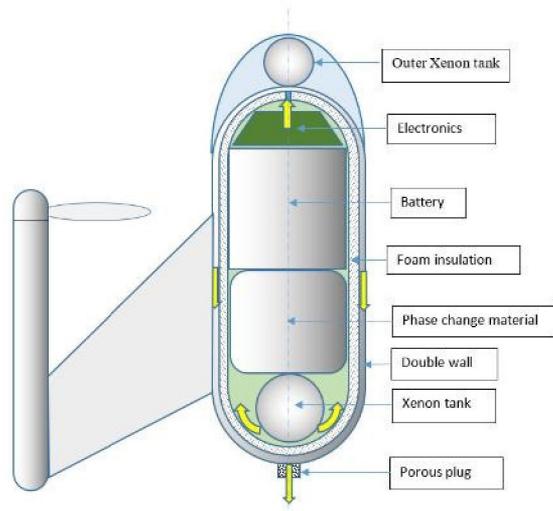
À 298 K et 9 MPa, la densité atteint 1706.1 kg/m<sup>3</sup>.

La conductibilité thermique est seulement de 0.029272 W / m K.

Figure 9 : Ambient pressure thermal insulation

Pour un cylindre de 30 cm de diamètre et 60 cm de haut, la perte thermique sera seulement de 202 W. Avec un accumulateur thermique de 12,5 kg, le flux de chaleur sera absorbé durant 9,3 heures.

La pression ambiante étant supérieure à la pression critique, il faut prévoir un deuxième réservoir de xénon qui prend progressivement la température de Vénus pour expulser le gaz du réservoir « froid ». La figure 9 montre la configuration de l'UAV. Il faut réduire le volume de la cavité afin de minimiser le besoin en xénon.



### Moteurs électriques de l'UAV :

Deux possibilités sont offertes :

- Moteurs chauds non isolés
- Moteurs classiques isolés et refroidis par circulation de fluide.

L'option « moteur chaud » s'inspire des travaux sur la propulsion plasmique. Les bobines utilisent un fil de cuivre à isolation céramique (Cérafil®), les aimants permanents sont en SmCo5 traités pour supporter 460°C (les aimants standards ne supportent que 250°C) au prix d'une perte de 20% des performances. Les roulements à billes céramiques sont lubrifiés à sec.

L'option : moteur classique

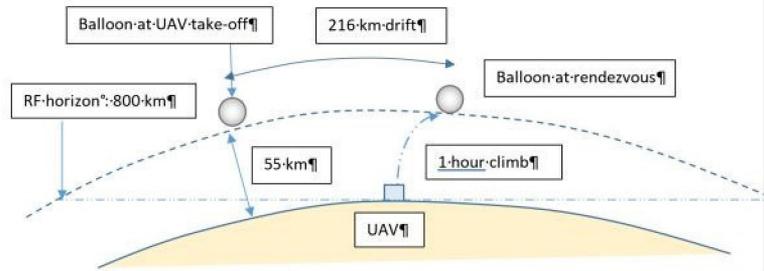
Le moteur doit être isolé sous vide pour éliminer le flux thermique ambiant. Le stator sera refroidi par circulation de liquide.

### Rendez-vous ballon / UAV

La figure 10 montre la technique de rendez-vous.

L'horizon RF (en termes de radio fréquence) du sol vers 55 km d'altitude a un rayon de 880 km de qui donne une durée de visibilité de 7,6 heures. Le ballon dérive à 216 km/h. La figure montre une ascension de l'UAV en une heure.

Figure 10 Balloon / UAV climb synchronisation



### 6.2 Variante : récupération d'échantillon par deuxième ballon

La récupération - au moins partielle - par un deuxième ballon est une solution de repli. Il se peut en effet que l'autonomie énergétique de l'UAV ne soit pas suffisante pour couvrir l'ensemble de la mission.

#### Ballon métallique :

En raison de la température élevée de la surface, la tenue d'un ballon en film organique est douteuse. La solution proposée consiste à utiliser un tissu de verre imprégné polyimide et étanché par un film d'aluminium gaufré. Le film d'aluminium pur offre un domaine plastique important. Le pliage devra être fait avec précaution pour éviter le déchirement du film.

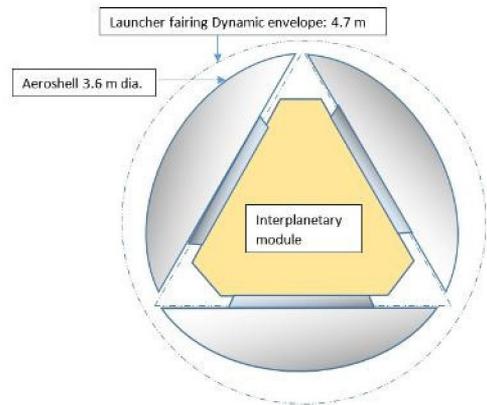
#### Ballon en Kapton® :

L'UAV atteint 30 km d'altitude, le ballon est alors gonflé, la température de l'atmosphère étant compatible avec le Kapton®. La pression est presque 10 fois plus élevée que sur Terre. A 55 km d'altitude, elle ne sera plus que de 0,05 MPa. L'UAV peut alors reprendre son vol pour le rendez-vous avec le système ballon / micro-lanceur.

### 6.3 Configuration des UAV sous coiffe

On peut placer jusqu'à trois atterrisseurs sous la coiffe d'Ariane 6 (figure 11). L'objectif est d'augmenter la probabilité de succès de la mission et aussi d'augmenter son intérêt scientifique en prélevant des échantillons de nature différente (repérés par des missions scientifiques précédentes). Le quatrième emplacement sur le troisième étage peut être réservé pour des échantillons d'atmosphère.

Figure 11 Multiples landers accommodation



La grande taille du bouclier thermique permet d'obtenir un coefficient balistique faible :

diamètre du bouclier.	m	3.6
Masse	kg	450
Coefficient balistique	kg/m <sup>2</sup>	44.21

La rentrée sera provoquée par un propulseur à propergol solide. Le bouclier sera éjecté à la fin de la descente et l'UAV va atterrir en mode hélicoptère.

### 7. Module ballon / micro-lanceur

La configuration proposée du micro-lanceur comprend deux étages à propulsion solide et un troisième étage à propulsion liquide. Elle s'inspire des études de micro-lanceur aéroporté effectuées par le CNES (MLA).

Elle permet de prévoir une charge utile significative (40 à 60 kg).

Le micro-lanceur doit avoir une longueur inférieure à 4,2 m afin de tenir dans le diamètre du bouclier de rentrée.

Les tuyères des deux premiers étages sont montées sur butées flexibles, ce qui permet le pilotage.

Le troisième étage peut être mis à feu plusieurs fois, ce qui est très utile pour les premières phases du rendez-vous. Le SCA (système de contrôle d'attitude) du troisième étage peut être utilisé pour le contrôle de roulis pendant le fonctionnement des deux premiers étages.

La configuration étudiée comporte :

- Premier étage P 2,5
- Deuxième étage P1
- Troisième étage L 0,25

Le P 2,5 et le P1 sont interpolés du P 6 qui avait été étudié pour le MLA.

**Description du troisième étage :**Ergols : MMH / N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

Propulseur principal 490 N, Isp = 312 s (moteur d'apogée de satellite)

Propulseurs de contrôle d'attitude 10 N (ou 22 N)

Réservoirs d'ergol : liner titane et renfort fibres de carbone époxy

Le troisième étage intègre les cylindres contenant les échantillons (figures 13 et 14). Afin de réduire la longueur hors tout, la tuyère pointe en avant, le troisième étage effectue un demi-tour avant mise à feu.

**Performances calculées :**

Le tableau suivant donne les valeurs de Delta V calculées :

Etage 1	Masse sèche	250	g0Isp	2696.925
	Ergol	2500	Delta V (m/s)	2395.31
Etage 2	Masse sèche	100	g0Isp	2893.065
	Ergol	1000	Delta V (m/s)	3424.04
Etage 3	Masse sèche	75	g0Isp	3059.8
	Ergol †	250	Delta V (m/s)	4486.67
LOM	kg	4181	Delta V total (m/s)	10237.55

LOM = masse initiale

La masse totale est limitée par la masse du système au départ de la Terre. Le Delta V donne des marges très confortables. On peut les échanger contre une masse d'ergol du troisième étage plus élevée afin d'augmenter la capacité de rendez-vous ou la masse des échantillons. Par exemple avec 185 kg d'ergol, le Delta V total passe à 8327 m/s et la masse d'échantillons augmente de 65 kg.

La masse sèche du troisième étage comprend 40 kg pour les réservoirs et les propulseurs (16% de la masse d'ergol), 20 kg pour les cylindres contenant les échantillons et 15 kg pour l'avionique, le lien radiofréquence et la batterie.

**Trajectoire du micro-lanceur**

Le tableau suivant donne le temps de combustion de chaque étage et le niveau d'accélération maximum.

Stage 1 burn time	s	90	Thrust	N	48218
Mean Flowrate	kg/s	27.78	Gamma max	m/s <sup>2</sup>	108.35 (11.05 g)
Thrust	N	74914.58	Stage 3 burn time	s	1873,34
Gamma max	m/s <sup>2</sup>	43.43 (4.43g)	Mean Flowrate	kg/s	0,16
Stage 2 burn time	s	60	Thrust	N	490
Mean Flowrate	kg/s	16,67	Gamma max	m/s <sup>2</sup>	0.15 (0.02 g)

Le temps total de combustion est de 2023 s (2080 s total). L'orbiteur a parcouru 14 900 km. Il n'est donc pas en visibilité du micro-lanceur à l'allumage de ce dernier, d'où l'intérêt des satellites relais.

Afin d'assurer la compacité de l'ensemble, le premier étage tient dans un volume de 2 m de long et 1,15 m de diamètre. Le volume du premier étage est 1,67 m<sup>3</sup> (densité du propergol = 1800 kg/m<sup>3</sup>).

**Parachute :**La masse du système *ballon / micro-lanceur* avoisine 6 tonnes, la taille du parachute sera de l'ordre de celle d'APOLLO.**Ballon de sustentation :**

Après largage du bouclier et du parachute, la masse à sustenter est de 5 tonnes. Il faut un ballon de 4000 m<sup>3</sup>, soit 4,84m<sup>3</sup> d'hydrogène liquide (341,3 kg), cela correspond à une sphère de 20 m de diamètre. L'hydrogène est préféré à l'hélium. Il est plus facile à stocker que l'hélium et il peut être réchauffé par réaction chimique. En effet, le gonflage du ballon doit être très rapide : moins de 3 minutes. Il faut une puissance de 8 MW pour amener les 341 kg d'hydrogène à température ambiante en 3 minutes. Cela est obtenu à l'aide d'un générateur de gaz hydrogène / oxygène. C'est l'ordre de grandeur de la puissance du générateur de gaz de la turbine du HM7.

**Tableau : stockage de l'hydrogène :**

Volume liquid	m <sup>3</sup>	4,84	Gas	m <sup>3</sup>	4000
specific gravity	kg/m <sup>3</sup>	70,516	Mass	kg	341,30
LH2 Sphere radius (10% ullage)	m	1,08	Outer sphere dia. (m)	m	2,26

**Tableau : dimensionnement du générateur de gaz**

Enthalpie H2 liquide	kJ/kg	1,224	Débit total H2	kg/s	1,90
Enthalpie H2 gaz NTP	kJ/kg	4233,5	Débit H2 stoichiométrique	kg/s	0,07
Durée	s	180	Puissance du générateur de gaz	kW	8025

**Conception du réservoir LH2**

Le réservoir sphérique est isolé par un nid d'abeilles sous vide recouvert de superisolant. Les pertes en orbite sont ainsi réduites à 20 W. Un cryo-réfrigérateur à deux étages fournit cette puissance, puissance électrique d'alimentation = 2 kW. Le refroidissement au sol est fourni par une boucle hélium.

**Description du système ballon / micro-lanceur**

La configuration au lancement comprend un module de croisière interplanétaire muni d'un module de propulsion chimique et un module de propulsion électrique (cinq propulseurs plasmiques de 5 kW dont un en redondance). La puissance des panneaux solaires est de 25 kW. Ce module est dérivé de la plate-forme d'un satellite de télécommunications.

Le module utilisé Ariane 64 à pleine capacité : l'étage n'est pas mis sur une orbite cimetièrre, l'orbite est super GTO avec une masse satellisée de 11 tonnes (la performance garantie en lancement double GTO est de 10 tonnes, il faut y ajouter 1 tonne d'adaptateur et 1 tonne d'ergol pour la désorbitation).

Un tir chimique au périgée injecte le module vers Vénus (450 – 600 m/s).

Une solution de repli consiste à utiliser un étage cryotechnique sous coiffe. L'ensemble est injecté en orbite basse avec une masse de 23 tonnes. Le moteur de 15 kN de poussée injecte directement le composite vers Vénus.

Après une phase balistique de plusieurs mois, un deuxième tir assure la capture planétaire sur une orbite très elliptique.

L'orbite est circularisée en propulsion électrique. Cela prend presque un an (en raison de la durée limitée des arcs de poussée à l'apogée). Après circularisation de l'orbite, la masse en orbite est de 6835 kg.

Un troisième tir induit la rentrée atmosphérique.

Le coefficient balistique est proche de celui de Soyouz (6 -7 tons for 17.4 m<sup>2</sup>).

Le bouclier de rentrée, formé d'un voile mince en Carbone -SiC, est structural ce qui permet de gagner de la masse. Une super-isolation protège la charge utile (figure 12).

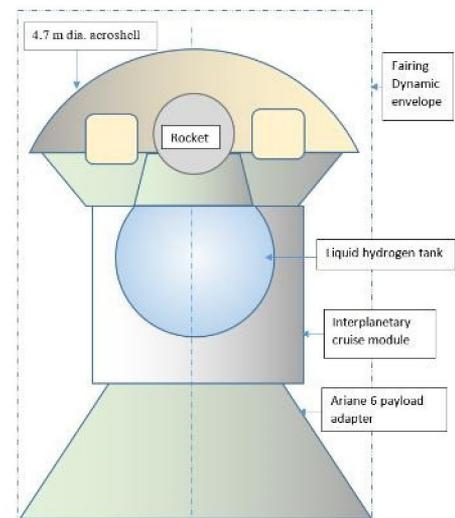


Figure 12: Launch configuration

**Description du troisième étage**

La figure 13 montre les quatre réservoirs d'ergol et les quatre récipients cylindriques de collecte d'échantillons. La coiffe a une section carrée à bords arrondis.

La figure 14 montre comment les échantillons sont récupérés depuis l'UAV jusqu'au troisième étage du micro-lanceur suspendu sous le ballon.

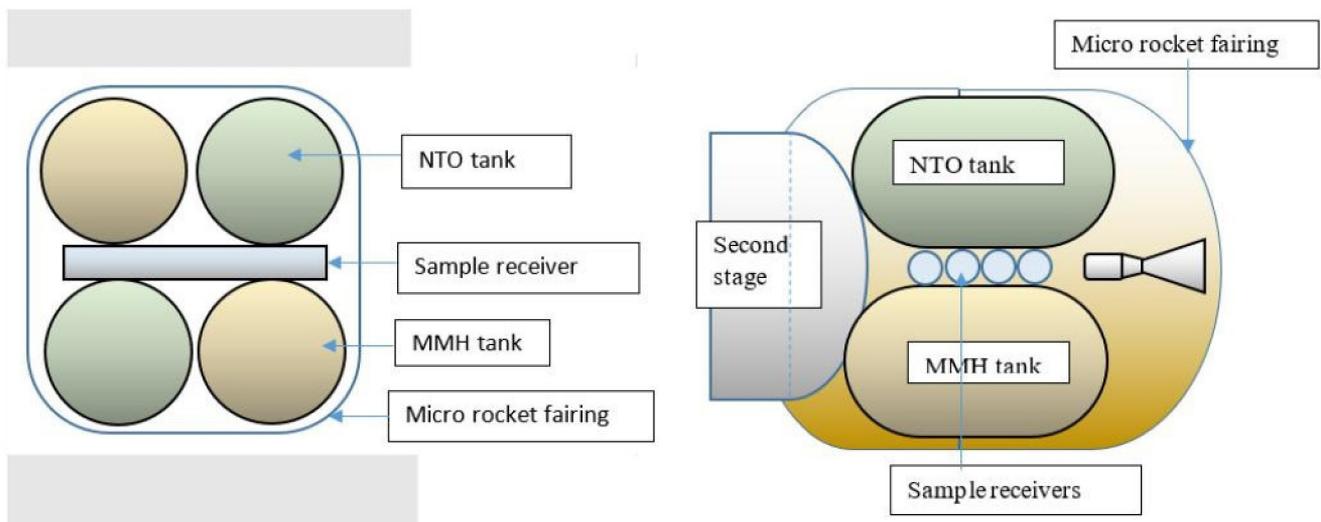


Figure 13 : Third stage front view (left) and side view

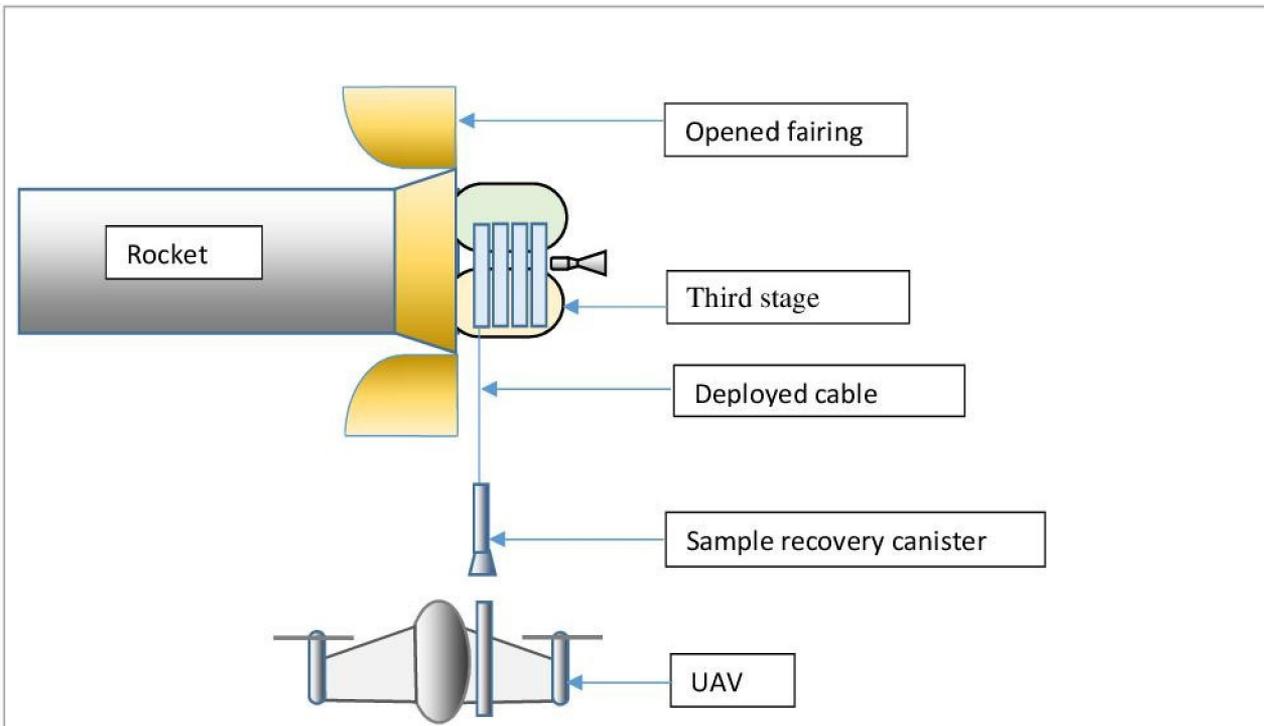


Figure 14 : Rendezvous and sample recovery

#### 8. Module orbital de retour d'échantillon

L'orbiteur est très semblable au module de croisière interplanétaire du complexe, il comprend un module de propulsion électrique et un module de propulsion chimique.

L'acquisition de l'orbite vénusienne est la même que celle du système :

- Tir chimique permettant la capture en orbite vénusienne.
- Passage de l'orbite très elliptique à l'orbite circulaire 300 km en propulsion électrique.

La capture du troisième étage du mini-lanceur par l'orbiteur est effectuée par à l'aide d'un harpon engagé dans la tuyère du propulseur (figure 15). L'ensemble du troisième étage est introduit dans le corps de rentrée pour le retour sur Terre.

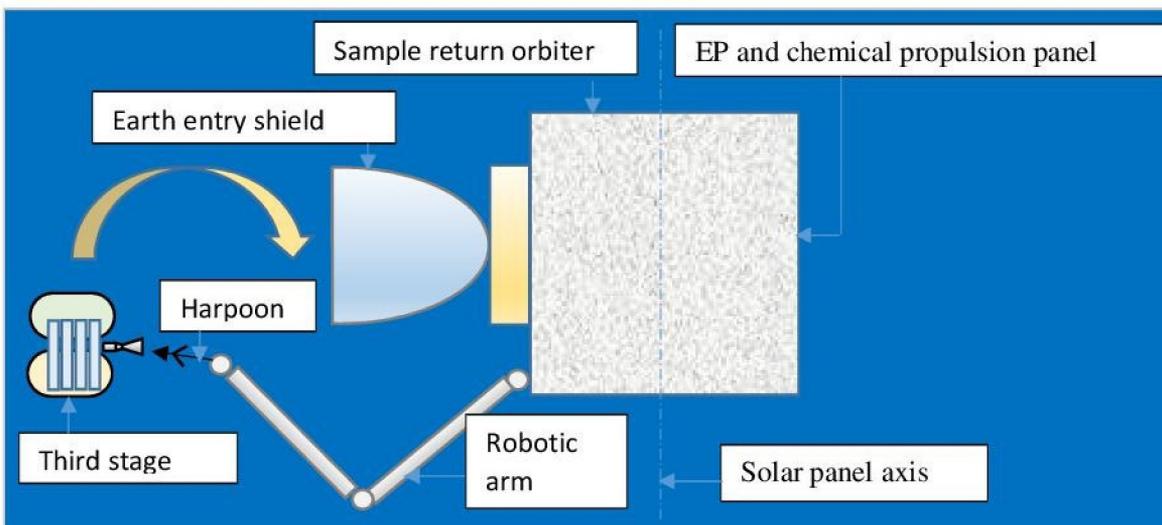


Figure 15: Third stage capture and samples recovery

Le retour vers la Terre s'effectue en sens inverse de l'acquisition :

- La propulsion plasmique permet de passer de l'orbite circulaire à une orbite très elliptique.
- Un tir chimique au périastre assure l'injection vers la Terre.
- La propulsion électrique peut être utilisée pour affiner l'orbite.
- Elle peut être utilisée aussi pour réduire la vitesse hyperbolique avant rentrée atmosphérique.

#### 9. Conclusion

Le profil de mission proposée vise à réduire les risques identifiés dans les propositions de missions antérieures. Elle implique le lancement de deux à trois ARIANE 6, la charge la plus lourde étant le système ballon / micro-lanceur.

La mise en oeuvre de trois atterrisseurs offre deux avantages :

- Elle supprime deux points de défaillance uniques : l'échec du retour de l'UAV, l'échec du rendez-vous avec le ballon.
- Elle accroît l'intérêt scientifique de la mission.

Les technologies étudiées dans cette proposition peuvent être appliquées à deux missions vénusiennes plus simples :

- Récupération d'échantillons d'atmosphère de Vénus : il n'y a plus d'atterrisseur.
- Atterrisseur à grande durée de vie sans retour d'échantillon. L'utilisation d'un RTG pour la fourniture d'énergie électrique et d'un pulse tube pour le refroidissement continu permet une mission de plusieurs mois, idéalement un jour vénusien complet. Cette option est décrite dans l'annexe 1.
- UAV à basse altitude, effectuant un relevé photo et une analyse de sol par spectromètre Alpha de plusieurs points, la mission étant limitée à quelques heures.

## 10. Références

- [1] Venus Sample Return A Hot Topic ... David Rodgers, et Al. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California. Conference Paper in IEEE Aerospace Conference Proceedings - February 2000
- [2] G.E.N. Scoon and J.-P. Lebreton, Venus Sample Return Assessment Study Report, ESA Report SCI (98)3, June 1998, Noordwijk, the Netherlands.
- [3] Chapter 6: Extra-terrestrial Drilling and Excavation. Kris Zacny et Al. final report of the AFL Science Steering Group ... Automation (ASTRA'98); 1998 Dec 1-3; ESTEC,
- [4] Venus Surface Sample Return: A Weighty High-pressure Challenge. Ted Sweetser, Jonathon Cameron, Gun-Shing Chen, Jim Cutts, Bob Gershman, Martha S. Gilmore, Jeffrey L. Hall, Viktor Kerzhanovich, Angus McDonald, Erik Nilsen, Walt Petrick, David Rodgers, Carl Sauer, Brian Wilcox, Andre Yavrouian, Wayne Zimmerman, and the Advanced Projects Design Team of the Jet Propulsion Laboratory.
- [5] Study overview of the Venus Entry Probe. Marcel van den Berg and Peter Falkner. An ESA Technology Reference Study. SCI-AP/2006/173/VEP/MvdB. 27/02/2007

### Annexe 1

#### Atterrisseur à grande durée de vie

La configuration de la sphère isolée sous vide permet de garantir une durée de vie indéfinie s'il est possible de fournir une puissance de réfrigération de 51 W pour une sphère de 50 cm de diamètre. En s'inspirant des techniques des cryo-réfrigérateurs spatiaux, on pourra fournir cette puissance à l'aide d'un réfrigérateur Stirling ou pulse tube avec une température froide de 300 K et un rejet vers l'ambiante à 733 K. Une estimation raisonnable indique une puissance électrique de 200 W. Cette puissance sera fournie par un RTG associé à un convertisseur Stirling. La NASA a développé ce genre de générateur pour ses missions futures vers les planètes extérieures.

Ce type d'observation a un grand intérêt car l'observation au sol d'un jour et d'une nuit vénusienne n'a jamais été effectuée (composition atmosphérique en particulier).

## COMMENT LE TRANSPORT AERIEN REpondra AUX BESOINS DE L'HUMANITE

### LES DÉFIS ÉNERGÉTIQUE ET CLIMATIQUE

#### La planète.

Sans revenir sur l'histoire réputée unique de notre vaisseau spatial il est clair que l'espèce humaine en est un facteur déterminant, son développement ne s'étant fait qu'au détriment de la « nature » c'est-à-dire le fruit de millions sinon milliards d'années d'évolution. Mais en définitive son impact sera négligeable au regard des bouleversements géologiques. La planète n'est donc pas en danger ; en revanche l'Humanité sur Terre est maintenant confrontée à la perspective d'un changement de civilisation sous l'effet de pressions qu'elle a elle-même provoquées : - démographique – énergétique – climatique.

#### Civilisation.

Pour 2050, si les 13 milliards de terriens ne sont plus à envisager, un nombre proche de 10 milliards représente tout de même un accroissement de plus de 50% par rapport à 2000. Cet accroissement vient essentiellement des pays non-OCDE. Le changement climatique avéré, hausse du niveau des océans, déplacement des moussons, assèchements, ne peuvent qu'amplifier les mouvements de migrations jusqu'à une déstabilisation des pays cibles, notamment en Europe. La pénurie d'eau cause de conflits, les revendications religieuses extrémistes, la migration de virus, peuvent conduire à limiter cette croissance, doit-on les souhaiter ? Cette prolifération aboutit mathématiquement à des concentrations (mégapoles) très dépendantes de liaisons faisant largement appel à l'aérien. De nombreux scénarios socio-économiques décrivent des évolutions de l'Humanité, tantôt vers une classe moyenne globale (d'un niveau plutôt modeste au sens présent), tantôt vers un bloc de riches dominant un monde de pauvres, voire un archipel de blocs différenciés et repliés sur eux-mêmes. Les échanges à grande distance sont dans tous les cas très différents du paysage actuel. Le « développement durable » comprend une harmonisation des conditions de vie des peuples de la Terre. Une puissance disponible par tête d'environ 3 kW y suffit mais le recours à d'autres énergies que la combustion de la biomasse et des fossiles s'impose. Le présent développement énergétique anarchique risque d'empêcher d'atteindre une équitable répartition des ressources tout en respectant l'atmosphère, et le niveau de consommation des ressources fossiles, en voie d'épuisement, n'est cependant pas assuré dans la durée. Grande est la sensibilisation à la dérive climatique, que les conclusions du GIEC, adoptées par les gouvernements malgré des contestations, attribuent aux activités anthropiques. Il est à craindre que l'exploitation politique et mercantile de ces conclusions n'aboutisse qu'à des faux-semblants sans traitement de fond du problème.

#### La place du transport aérien.

Le réseau de transport aérien commercial s'est continûment développé et a pris une importance économique et sociale universelle. Ce réseau constitue un système complexe, qui comprend de nombreux systèmes eux-mêmes complexes (ATM, aéronefs, compagnies,...), et s'insère dans le système méta complexe de l'Humanité sur Terre. Il semble peu probable que l'humanité entière adopte avant un bon siècle un style de vie qui élimine volontairement le transport aérien, même si le goût de la mobilité futile s'éteint, même si le voyage virtuel restitue toutes les sensations ; la construction socio-économique sur le modèle prévalent au sein de l'OCDE va continuer de s'étendre, sans doute amendée, et perdurera à l'horizon accessible à nos réflexions, qui ne va guère au-delà de 2100. Cette activité de service offre de multiples avantages pour l'économie mondialisée, ainsi le tourisme et les exportations de produits frais font vivre des populations et leur apportent des ressources qui peuvent aider un développement, de multiples liaisons ne pourraient avoir la même fréquence sans voie aérienne dans des contrées d'accès difficile, le franchissement fréquent des océans relève de l'aviation. Il reste encore beaucoup de zones peu habitées dont le développement sera du à l'aérien. L'intensité des rencontres entre cultures et civilisations différentes est certainement un facteur de paix et de prospérité. Les relations de parentèle et d'amitié peuvent être maintenues malgré la dispersion. Des effets pervers sont inévitables, dégradations d'écosystèmes, corruption de populations par le luxe, frustrations, marchandisation des coutumes, le tourisme de masse commence à être rejeté. Une forme d'autorégulation assurera la pérennité. L'avenir du transport aérien par JC Ripoll, Novembre 2019 Page 2 sur 3 Le « momentum » acquis par les pays émergents comme la Chine et l'Inde, ainsi que la mondialisation à laquelle a largement contribué le transport aérien, exigent une rapidité d'évolution qui implique les déplacements rapides. Briser cette spirale demande une puissance planétaire. Le transport aérien a donc semble-t-il de beaux jours devant lui. Néanmoins le maintien du taux de croissance du trafic actuellement constaté, un doublement en quinze ans, ne paraît pas compatible avec les contraintes liées aux infrastructures et à la sécurité de la circulation, ni même à plus long terme avec les contraintes énergétiques. Une croissance exponentielle ne peut se poursuivre indéfiniment, une asymptote apparaît toujours, et en effet, divers facteurs remettent en cause cette croissance de façon fondamentale.

## Le défi énergétique.

Un péril particulièrement consistant résulte de la dépendance envers un carburant aux caractéristiques extraordinairement adaptées aux exigences aéronautiques, tiré d'une fraction des hydrocarbures fossiles. Ces ressources ne sont pas inépuisables, on ne peut pas dire que leur exploitation fasse l'objet d'une gestion rationnelle, leur répartition donne des pouvoirs particuliers à quelques pays de cultures très diverses, l'accès aux réserves justifie bien des conflits. Avec un brut abondant il est facile de satisfaire par distillation économique les besoins en produits « légers », dont le kérosène et le jet-fuel. La raréfaction du brut conduira à des procédés de pétrochimie mettant en concurrence les clients de différents secteurs ; l'aérien y devra trouver sa place en fonction des quantités et des prix en cause. L'épuisement progressif, et inéluctable, de la ressource peut selon nous donner lieu à deux classes de scénarios. Compte tenu de la finitude des ressources, la production passe nécessairement par un maximum, mais le pic classique correspond à une situation de relève d'une production par une autre. Il y aura pic du pétrole, puis du gaz, puis du charbon dans des conditions normales si et seulement si, chaque fois la relève est assurée. Une première hypothèse est alors que, grâce à une gouvernance mondiale, d'une part il est procédé à des économies très importantes de consommation des fossiles, d'autre part un effort soutenu de recherche est effectué pour mettre au point la ressource énergétique de relève. Cette approche respecte à la fois la protection de l'environnement et l'obligation morale de laisser à nos descendants une part de ces ressources fossiles si commodes, et la solution de rechange. Alors une transition paisible est possible selon le pic classique. La difficulté est d'assurer en même temps l'amélioration des conditions de vie de populations entières. La seconde hypothèse est à l'inverse l'incapacité de l'humanité à s'entendre sur une politique planétaire. Alors l'effet des rejets de gaz carbonique est méprisé, la demande de pétrole ou de ses substituts ne peut être satisfaite qu'en exploitant le charbon et autres fossiles de façon intense. Le prix du carburant freine la consommation qui se concentre sur les transports. La production connaît un niveau à peu près constant (plateau au lieu de pic) pendant une relativement longue période, suivi d'une chute brutale. Ces conditions ne sont pas favorables à l'émergence de nouvelles ressources énergétiques et une crise est à prévoir en raison de la brutalité de la transition. La date de cette crise est d'autant plus proche que le niveau de consommation sera élevé, et ce délai réduit ne donnera pas le temps de préparer la relève. Au total nous ne discernons pas à ce jour de tendance favorisant l'une ou l'autre de ces hypothèses, gouvernance mondiale « vertueuse », ou continuation de la tendance actuelle « business as usual ». Les techniques actuelles ne sont pas en mesure de faire face à l'épuisement des ressources fossiles, l'incertitude sur la date de cet épuisement ne change rien au problème. L'aéronautique, qui maîtrise les meilleures technologies, se doit d'être très vigilante en la matière et de préparer par anticipation les moyens de compenser cette évolution. Le « catastrophisme éclairé » indique la voie à suivre : préparer la catastrophe comme inéluctable conduit à l'éviter.

## Le défi climatique.

Le deuxième facteur majeur découle directement du volet environnemental du développement durable, il s'agit des limitations d'émissions de gaz à effet de serre. Alors même qu'il ne représente aujourd'hui qu'une très faible fraction des émissions totales, le transport aérien est stigmatisé, en arguant d'un impact accru des émissions en altitude, et en usant de comparaisons non fondées au regard du service rendu : personne ne traverse l'Atlantique en automobile ou en chemin de fer. En raison de son déjà très haut niveau technologique le transport aérien est mal placé pour afficher des progrès spectaculaires dans ce domaine. En revanche le transport terrestre et l'habitat peuvent assez facilement réduire leur part, augmentant d'autant la proportion qui sera imputée au L'avenir du transport aérien par JC Ripoll, Novembre 2019 Page 3 sur 3 transport aérien, lui-même en croissance intrinsèque. L'aéronautique est passée au rang d'industrie de droit commun, et subit donc toutes les exigences des citoyens. .

## Quelles conséquences pour le transport aérien ?

S'il est certain qu'un arrêt brutal de ce service provoquerait des difficultés, il faut bien considérer que, malgré des évaluations quelque peu dithyrambiques, l'industrie aéronautique est quantité marginale, et ne peut donc « jouer seule », et cela quel que soit le scénario. Elle ne peut non plus attendre que des programmes généraux aboutissent en lui procurant des solutions. Il lui faut donc s'associer avec des partenaires « producteurs d'énergie » pour soutenir les voies les plus favorables à ses intérêts. Il nous paraît même que cette industrie qui maîtrise à haut niveau à peu près toutes les techniques devrait prendre une position menante. Le premier objectif à moyen terme est d'assurer une continuité, alors que la durée de vie des appareils atteint des décennies, et que la production d'un modèle doit durer une vingtaine d'années pour être vraiment rentable, et aussi que les infrastructures aéroportuaires ne peuvent évoluer bien vite sur l'ensemble mondial des plates-formes. Cette continuité exige la disponibilité à un coût acceptable d'un carburant pratiquement identique au kérosène actuel. Le deuxième objectif est de disposer au plus vite de la relève à long terme, afin de parer au risque du second scénario : il ne peut s'agir, aux vues actuelles, que d'un vecteur de synthèse rappelant le kérosène. La quasi-identité de ce carburant avec celui utilisé par les applications terrestres fixes ou mobiles serait d'un grand intérêt. Ces produits ne sont en somme que des accumulateurs de l'énergie mise en œuvre pour leur fabrication, et pour la ressource primaire le recours au nucléaire semble s'imposer, avec l'appui du solaire dans les zones très favorables. La matière première, le minerai, ne peut être pour l'essentiel que le charbon, la biomasse restant marginale. La forte expansion de l'activité aérienne est par essence porteuse de crise. Les constructeurs tablent à la fois sur la croissance de la demande

dans un contexte de stabilité politique mondiale et sur le renouvellement anticipé de certaines flottes pour cause d'émissions trop élevées. Aucun de ces facteurs n'est assuré. Les conflits d'accès aux ressources énergétiques et les tensions internes dans les pays à très forte population peuvent provoquer des troubles gravissimes. Or l'insécurité est un paramètre très influent sur la propension à voyager. Le repli des trafics sur les dessertes domestiques impliquerait une adaptation drastique de la production d'avions. Une constante des divers scénarios nous paraît être la nécessité de disposer d'une vaste gamme d'appareils très spécialisés selon leur segment d'utilisation. La montée en puissance d'entités financièrement très puissantes, l'universalité des compétences, évoquent la probabilité de restructurations industrielles profondes à l'échelle mondiale, dans lesquelles les entités européennes notamment pourraient disparaître. La mondialisation se traduit nécessairement par une réduction du nombre des entreprises à ambition planétaire. Pour ce qui est des émissions la technique est déjà à l'œuvre et va à ses asymptotes. Il faut maintenant s'attaquer aux pratiques: choix des routes et destinations, fréquences, étapes ou long très long courrier, etc. Les taxes devraient porter non sur le carburant consommé mais sur les sièges vides. Le critère n'est pas l'efficacité d'un avion mais l'efficacité de la compagnie (comparaison annuelle émissions/revenue pax km). Le taux de remplissage y joue un grand rôle. Enfin, il y a la question des "promesses" de réduction des émissions, énoncées par ATAG, IATA, etc., en partie par la technique et les opérations, mais beaucoup par les compensations (CORSIA), promesses dont on sait qu'elles sont globalement irréalistes. Le danger paraît être dans le retour de bâton lorsqu'il sera clair que ces promesses n'ont pas été tenues. Ces organismes et les compagnies devraient marquer de la prudence dans ce domaine.

### **Conclusion.**

La conclusion que nous tirons est que la situation de l'aéronautique dans son ensemble, mais plus particulièrement européenne, est plus critique qu'on ne le pense d'ordinaire, et que les objectifs énoncés par le comité ACARE et l'OACI mériteraient d'être actualisés et repris dans un programme plus ambitieux, qui allierait les objectifs techniques avec une approche sociétale et une vision politique à long terme planétaire. L'Europe seule ne peut arriver à mettre en marche le mouvement mondial nécessaire pour normaliser les nouvelles solutions. Sauvegarder ce qui est une infrastructure d'intérêt planétaire exige un programme relevant de l'ONU, en donnant à une OACI consolidée plus de pouvoirs et d'initiatives, en parallèle avec une organisation mondiale de l'énergie et de l'environnement.

## Destination « Espace »

De notre envoyé spécial à Hutchinson (Kansas)

Mardi après-midi, le jeune Maxime (12 ans) se présente avec sa famille au Cosmosphère d'Hutchinson, pour vivre une expérience hors du commun : un voyage (fictif) à bord de la Station Spatiale Internationale, d'une durée de 5 jours.

Tout y est plus vrai que nature : tous les équipements sont des doublons des équipements de la NASA, de la centrifugeuse (4G) à la salle d'Opérations, en passant par la maquette du module spatial, qui peut tourner autour de son axe pour simuler les diverses positions en apesanteur.

16h00 : les familles quittent le site, et voilà Maxime plongé dans ce grand bain, avec ses camarades du « space camp ».



Visite du Musée associé et premier briefing.

Le lendemain à l'aube, présentation de la fusée et de ses spécificités, de la documentation.

Petit tour dans la centrifugeuse pour s'accoutumer aux accélérations (Maxime trouve que 3G c'est déjà pas mal) et découverte de la « navette » qui décollera en soirée.

Maxime est désigné « commander » de la mission. A ce titre, il lui appartiendra de diriger les opérations, en se référant à la documentation (un gros bouquin d'une centaine de pages... à « dominer » !!!). Pour la première fois, un Français commandait une équipe spatiale américaine !



Et pour se mettre dans l'ambiance, confection de repas à base de sachets lyophilisés et test des toilettes ...

Et c'est l'arrivée réussie à bord de l'ISS après un arrimage « aux petits oignons ».

Travail à bord, sur divers éléments, fonction de l'orientation du module (et oui la pesanteur de notre bonne vieille terre ne permet malheureusement pas de « nager » à l'intérieur de la station...)

Et comme toutes les bonnes choses ont une fin, préparation du retour sur terre.

Retour dans le module de liaison, décompte final, désolidarisation de la station, allumage des rétro fusées à la seconde près pour se présenter sur le bon angle dans la sphère atmosphérique et « black out » durant le passage dans le nuage de plasma.

Top pour l'ouverture des parachutes de freinage !

Catastrophe, une des parachutes s'est mis en torche. Le Commandeur doit régler le problème pour ne pas s'abîmer en mer. Plongeon fébrile dans la documentation, trouver la bonne page pendant que les alarmes retentissent de façon stressante !

Enfin, voilà la bonne procédure : activation des parachutes de secours.





Ouf, ils fonctionnent ! Contact avec l'équipe de récupération en mer pour confirmer le nouveau point de chute ; point confirmé, le porte-avion et ses hélicos seront là à point nommé...

On sort de la capsule, le front moite, car la réalité a dépassé la fiction, et à 12 ans, cela fait du bien de retrouver sa famille le samedi suivant, sain et sauf, avec les félicitations de l'Equipe du Space-Camp.

Le diplôme traditionnel récompensera Maxime. Il pourra l'afficher fièrement dans sa chambre.

Ayant réussi ce premier « camp » il pourra postuler pour des « camps » supérieurs, faisant état de sa « grande » expérience lors de ce premier « vol » réussi !!!

C'est ainsi que nos amis américains arrivent à susciter des vocations parmi les jeunes gens, dans des conditions très proches de la réalité, et pour une somme de l'ordre de 550 \$, pension complète et accès aux installations techniques du Musée.

A noter qu'il existe aussi des programmes particuliers pour les jeunes handicapés, adaptés à leurs possibilités.

Pour plus de renseignements :

[www.cosmo.org/education/camps](http://www.cosmo.org/education/camps)

NB : Il existe aux USA plusieurs musées et centres qui organisent des présentations et des camps similaires, comme notamment le Space & Rocket center de Huntsville en Alabama et le Kennedy Space center en Floride, où les jeunes peuvent y vivre de telles expériences et sans doute y trouver leur vocation"



+



## Hommage à André REMONDIERE



André REMONDIERE a été Président du Groupe 3AF Midi-Pyrénées à partir de 1985, bien que sachant qu'il avait été pressenti pour prendre la direction du Centre Spatial Guyanais.

A l'époque, Alice TORGUE était Vice-Présidente du Groupe Régional 3AF. Nous avons gardé contact avec lui car il revenait à Toulouse toutes les 6 semaines. Il nous avait proposé de faire une conférence spatiale agrémentée de projections inédites mises à disposition par le CNES. Le thème majeur a rapidement convergé sur Ariane 4, dont le premier lancement était prévu au printemps 1987.

Il nous avait fait promettre, avant de quitter Toulouse, d'aller le voir pour visiter le Centre Spatial et pourquoi pas, assister au premier lancement d'Ariane 4. Difficile de refuser, mais pas facile à organiser ! Alice TORGUE a donc pris l'initiative d'organiser un voyage pour quelques membres 3AF de Toulouse et de Bordeaux en visant si possible, la date du premier lancement d'Ariane ... mais ce dernier a été retardé, les réservations étant faites, nous sommes partis.

Cependant, nous avons eu le privilège d'une magnifique visite sur place, sous le regard d'Ariane sur son pas de tir.



Premier lancement d'Ariane 4 le 15 juin 1988

### **André REMONDIERE en quelques lignes**

Diplômé ingénieur du CNAM, il travaille à l'ONERA de 1954 à 1969 sur le pilotage et les aspects de stabilisation automatique.

Il rentre au CNES en 1969, où il devient Directeur Général d'Intespace en 1983.

Il est nommé Chef du Centre Spatial Guyanais de 1986 à 1991, avec à son actif 33 lancements et 50 satellites en orbite.



A son retour, il est nommé Directeur Central de la Qualité du CNES jusqu'à sa retraite en 1995

Il devient également le Président de l'Institut des Sciences Spatiales et Applications de Toulouse (ISSAT), poste qu'il tiendra jusqu'en 2001.

Il a été inhumé au cimetière de Fontenay-aux-Roses (92260)