

Atelier Expérimentation et Instrumentation – BREST – 17-19 octobre 2017

INSTRUMENTATION Avions-Ballons

Claude Robert



*Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace
3A, Avenue de la Recherche Scientifique, 45071 ORLEANS*

- **Plus de 30 ans d'expérience en instrumentation embarquée sous ballons stratosphériques puis en avion**
- **Développement en cours d'un instrument embarquable sous BSO et avions de recherche: Le Projet SPECIES**
- **Présentation de la démarche de conception:**
 - **Analyses comparées des contraintes spécifiques des deux types de plateforme**
 - **Définition des contraintes majorantes**
 - **Architecture induite pour SPECIES**

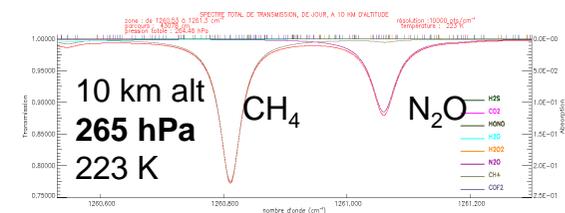
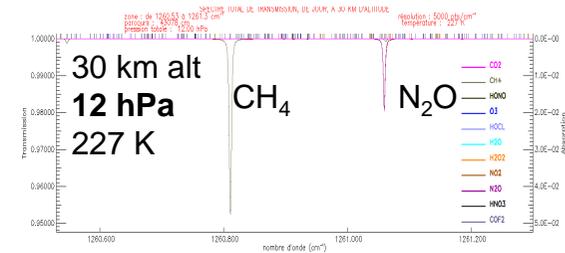


HISTORIQUE: >20 ans d'expérience

SPIRALE : mesures **sous ballon** *in situ* par spectro. laser IR

Cellule optique multipassages non résonnante de Herriott : 300-500m de parcours à l'air libre ambiant

→ haute troposphère & stratosphère



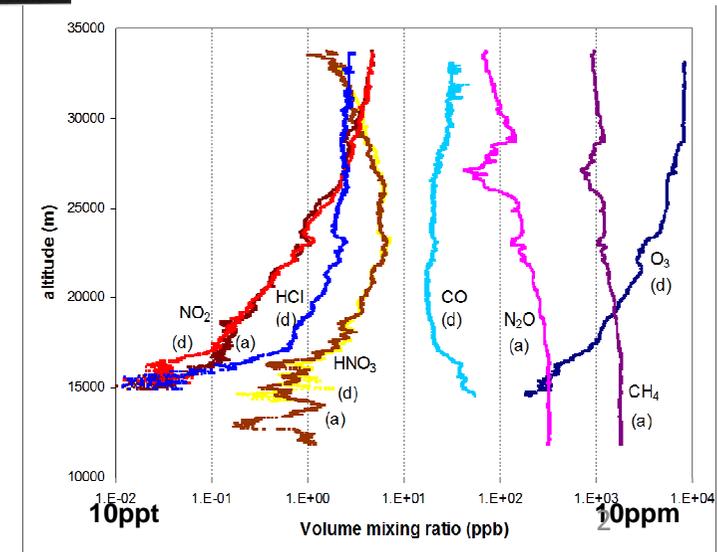
6 voies (lasers) simultanées

→ **profils verticaux (mesure chq 1s = 2 à 5 m résolution)**

exactitude estimée (accuracy)

CH ₄	3%	Etalonné par paramètres spectroscopiques Intercomparaisons instruments ballons, modèles & satellites (MIPAS, GOMOS, ACE-FTS, ODIN-SMR, MLS-AURA)
N ₂ O	3%	
O ₃	3%	
CO	3%	
HNO ₃	20%	

& NO₂, OCS, HCl, HOCl, H₂O₂, CF₂O, T...



HISTORIQUE: >10 ans d'expérience

SPIRIT : mesures **en avion** in situ spectro lasers IR

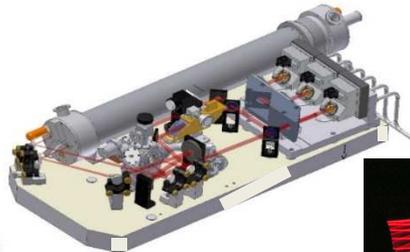
Cellule multipassages non résonnante de Robert (100-200 m parcours optique) à pression réduite régulée → **troposphère**



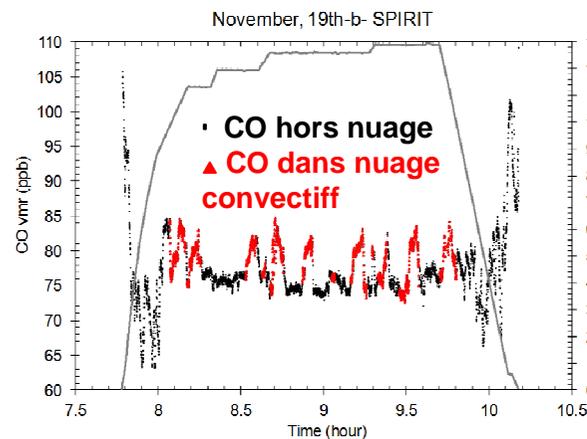
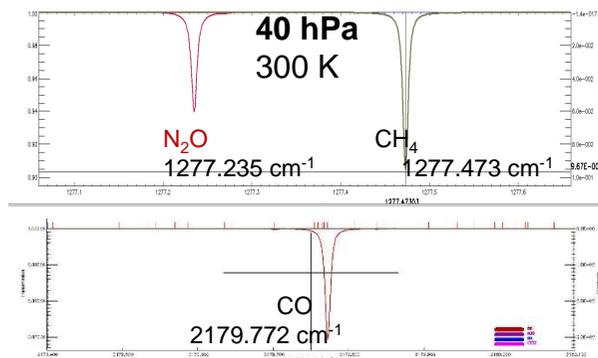
3 voies de mesure chq 1,5 s → Profils horizontaux 100-200m & Profils verticaux 2-5m résolution

	précision (1 σ)	exactitude (étalonnage WMO, NOAA)
CH ₄	4ppb (0.2%)	18ppb (1%)
CO	0.3ppb	1ppb
NO ₂	0.3ppb	0.5ppb

& CO₂ (± 8 ppm exactitude), N₂O (± 4 ppb exactitude)



Cellule de Robert



Participation aux projets européens FP7

SHIVA

DACCIWA

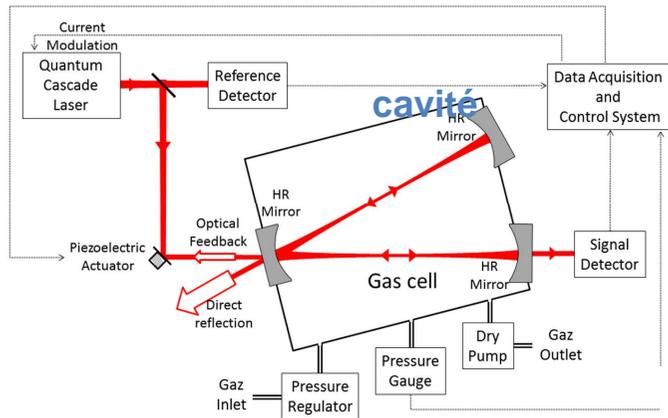
Malaisie

Afrique Ouest

Application à SPECIES

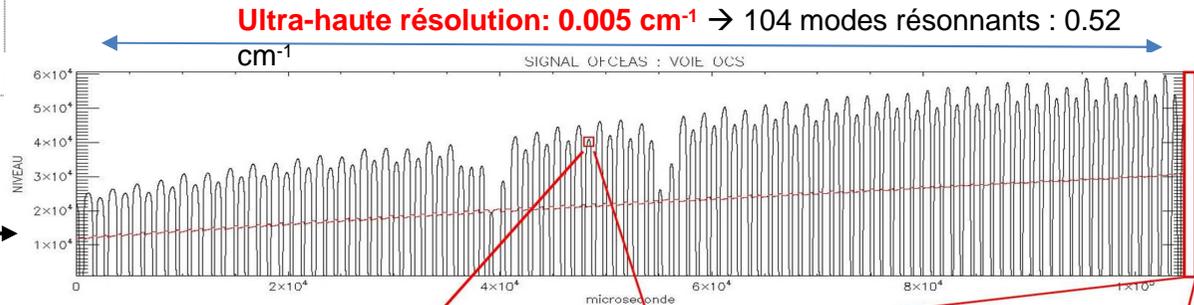
SPECIES: SPECTromètre Infrarouge à lasErs in Situ

PRINCIPE DE MESURE DE L'OF-CEAS : Optical-Feedback Cavity-Enhanced Absorption laser Spectroscopy
 (ou **SARA** : Spectroscopie laser par Amplification Résonnante d'Absorption)

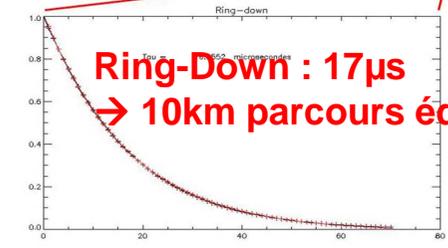
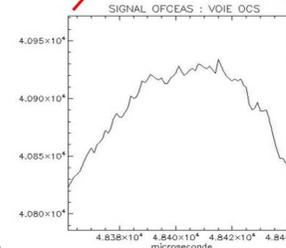


Couplage très efficace du faisceau laser à la **cavité** par rétro-action optique (résonance)
 → Amplification du signal et auto-calibration de l'échelle spectrale

Spectre expérimental obtenu pour la voie à 4,87 μ m de SPECIES →



- Fréquence d'acquisition de spectres: 8 Hz
- Plage dynamique de mesure > 10⁴
- Temps de réponse : 2 secondes car petit volume d'échantillonnage (< 100 cm³)
- Matériaux adaptés aux molécules collantes (acier inox électropoli, PFA, ou revêtement de silice amorphe)



Analyses comparées des contraintes spécifiques des deux types de vecteurs

Vecteurs considérés:

•Ballons Stratosphériques Ouverts (BSO)

- ‘Gros ballons’ : de 10000 à 1 000 000 m³
- Charge importante : plusieurs centaines de kg
- Haute altitude: 45 km max
- Utilisation d’une nacelle générique CNES
- Énergie par batteries (28 V, jusque 800W, 10 heures)
- Instrument automatique ou contrôle de l’instrument par Télémessure et Télécommande (TM-TC)



•Avion de recherche (instruments en cabine)

- Type Falcon-20 (SAFIRE et DLR), ATR-42 (SAFIRE)
- Voire HALO Gulfstream (DLR)
- Altitude max 13 km (Falcon), 15km (HALO)
- Utilisation d’une baie 19” certifiée → masse: 100kg
- Energie: 28V, 220 VAC jusque 1000W
- Instrument automatique ou contrôle de l’instrument par l’expérimentateur



Principale difficulté : La CERTIFICATION

Au delà de faire un instrument capable de fonctionner en avion ou sous ballon, encore faut-il être autorisé à voler : il faut obtenir les certifications exigées par les autorités.

•Pour les ballons, le CNES est l'organisme qui assure la mise en œuvre des ballons et décerne la certification du matériel embarqué.

C'est la nacelle complètement équipée qui est certifiée

•Pour les avions de recherche français, SAFIRE gère la certification auprès des autorités (DGAC). Pour les avions du DLR, le dossier de certification est géré par une société privée accréditée.

C'est l'avion complètement équipé de ses instruments scientifiques qui est certifié

Dans tous les cas, les instruments doivent apporter la preuve du respect des règles de conception imposées par la certification (plusieurs documents, comptes rendus d'essais éventuels)

(Ex pour SPIRIT avion en 2011: 400 pages, SPECIES ballon: 300 pages aujourd'hui...)

DOCUMENTATIONS UTILES POUR LA CONCEPTION DES EXPERIENCES A prendre en compte dès le début du projet

- DLR

Guideline for Users and Design Engineers to prepare certification-doc's in the DLR design organization
(avions du DLR sauf HALO)

- SAFIRE

Instructions pour l'installation d'équipements scientifiques embarqués dans les avions SAFIRE
(Falcon 20, ATR 42, Piper Aztec)

- CNES

MANUEL UTILISATEUR POUR LES BALLONS STRATOSPHERIQUES OUVERTS DU CNES
PARTIE III: Conception de la NCU

Contacts:

SAFIRE : *Laurent Guiraud & Thierry Perrin*

CNES : *André Vargas*

DT-INSU : *Nadir Amarouche*

DLR : *Robert Uebelacker (Robert.Uebelacker@dlr.de)*

Principales règles à respecter pour la certification

- **Résistances structurales**

- **Exemple:** Falcon 20 pour les avions et nacelle entre 200 et 400 kg pour les ballons

Tenue aux accélérations (en g)						Facteur de sécurité pour le calcul RDM
Direction	Haut	Bas	Avant	Arrière	Latérale	
Avion	6,5	6	9	1,5	3	2
Ballon	0	8	1,7	1,7	1,7	2

Remarque: bien que les accélérations soient plutôt dynamiques (chocs et vibrations) les calculs RDM sont à justifier en mode statique)

Principales différences avions-ballons:

Efforts horizontaux plus importants sur avion

Effort vertical plus important sous ballon (même 15 g à l'atterrissage mais hors certification)

- **SOLUTIONS SIMPLIFICATRICES:**

- **Recours à une nacelle générique du CNES :**

La structure principale et la liaison à la chaîne de vol ne sont plus à considérer; restent les études des instruments et de leurs fixations dans la nacelle.

- **Recours à une baie avion certifiée (SAFIRE ou DLR)**

Restent les instruments et leurs fixations qui se limitent au respect de règles de fixation (nombre et type de vis de fixation et leurs emplacements en fonction de la masse fixée dans la baie)

Principales règles à respecter pour la certification

- **Vibrations**

- **Ballon:**

- Très faibles en vol, sauf pour la récupération après atterrissage (transport routier)

- **Avion**

- En général peu ou pas de données dans les documents précédents, à préciser suivant le type d'avion

- Prévoir:**

- Systèmes de blocage des vis (obligatoires): rondelle élastique ou frein-filet et serrage au couple des vis de structure

- Système antivibratoire des éléments sensibles aux vibrations (ex : système optique)

- **Matériaux**

- Sous ballon n'utiliser que des matériaux inoxydables (présence d'ozone et d'UV).

- Contraintes maximale pour les avions:

- Matériaux autorisés :**

- Métaux (principalement alliages d'aluminium, 2017, 2024)

- Téflon (PTFE, TFE, PFA, FEP)

- Silicone

- Caoutchouc (NR isoprène)

- Hypalon

- Néoprène

- Et tout autre matériau répondant aux normes aéronautiques

- **Fixations: rivets ou vis aux normes aéronautiques (NAS,AN,MS) de préférence en inox (BSO)**

Principales règles à respecter pour la certification

- **Electricité**

Les exigences pour les vols en avions couvrent les exigences des vols sous BSO

Utilisation de connecteurs et de fils aux normes aéronautiques, respect des gauges des fils en fonction des courants y circulant. Protection des lignes d'alimentation par fusibles, etc ...

Une attention particulière doit être portée aux problèmes CEM. Des tests en chambre anéchoïde peuvent être demandées (cas du DLR) et dans tous les cas des essais sont réalisés pendant les intégrations.

Autres: il y a d'autres exigences dans le cas de présence de laser, d'enceintes sous pression, etc...

CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES POUR UN VOL EN AVION ET SOUS BSO

	Avions	BSO
Température ambiantes	10 à 50°C	-80 à +40°C
Pressions	700 à 1000 hPa	3 à 1000 hPa
Autres		Présence d'ozone UV

- Le contrôle thermique des instruments réclame une analyse approfondie.
- En pratique sous BSO, avec une isolation adaptée, la température ne descend pas en dessous de -25°C. Le vrai problème est le risque de surchauffe des équipements électroniques liée aux basses pressions → surdimensionnement des radiateurs (x3)
- Par ailleurs, les alimentations électriques par batteries sous BSO ou fournies par l'avion fluctuent de façon importantes (de 20 à 35V : batteries Ballon, et de 24 à 32V en avion) → prévoir des convertisseurs DC-DC à large plage d'entrée.

Aspect financier sur le développement:

(à l'exclusion de tout frais opérationnel tel que frais de mission, heure de vol, immobilisation de l'avion, campagne de vol, etc...)

Avion (Safire)	Avion (DLR)	BALLON (CNES)
Mise à disposition d'une baie : GRATUIT	Achat d'une Baie: 11k€	Mise à disposition d'une nacelle générique: GRATUIT
Certification: GRATUIT	Certification: >20k€ (sous traitée par le DLR)	Certification: GRATUIT
Essai CEM en chambre anéchoïde : 5k€		Essai non demandé

Aspect RH

Dans l'hypothèse du développement d'un instrument sur l'un ou l'autre vecteur **et si le concept instrumental le permet**, la prise en compte de l'autre vecteur n'a qu'un impact réduit sur les RH supplémentaires: La grande majorité des études et des documents sont utilisables pour les deux certifications.

Il reste ce qui est spécifique aux avions ou aux ballons tel que : la TM-TC (liaison TCP ou RS232), le contrôle thermique des instruments, les prises d'air éventuelles, ...

Application à SPECIES

Objectif: définir une instrumentation pouvant voler aussi bien en avions de recherche que sous BSO ou au sol en manip de terrain ou en labo

Des choix architecturaux sont nécessaires dès le début du projet:

- 1) Le principe de mesure se prête bien à une architecture modulaire → chaque système OFCEAS est assemblé en une entité complètement autonome (avec enregistrement des données et communication TCP utilisable pour la TM et la TC des BSO).
- 2) Utilisation pour l'avion de baies certifiées avion → Chaque système OFCEAS est intégré dans un rack au standard de fixation des racks 19"
- 3) Un module au format 19" comprend les systèmes de pompage et de circulation d'air.
- 4) Définition d'une baie au standard 19" facilement calculable pour les vols sous BSO
- 5) Appel à la division nacelle du CNES pour l'utilisation d'une nacelle générique et la fourniture de l'énergie via leur MDE (Module de Distribution d'Énergie)
- 6) Conception prenant en compte les normes les plus contraignantes: celles des avions pour la plupart.
- 7) Les systèmes de contrôle thermique et de prélèvement d'air restent spécifiques aux vecteurs: canne de prélèvement sous BSO, utilisation d'une entrée d'air existante sur avion



Application à SPECIES

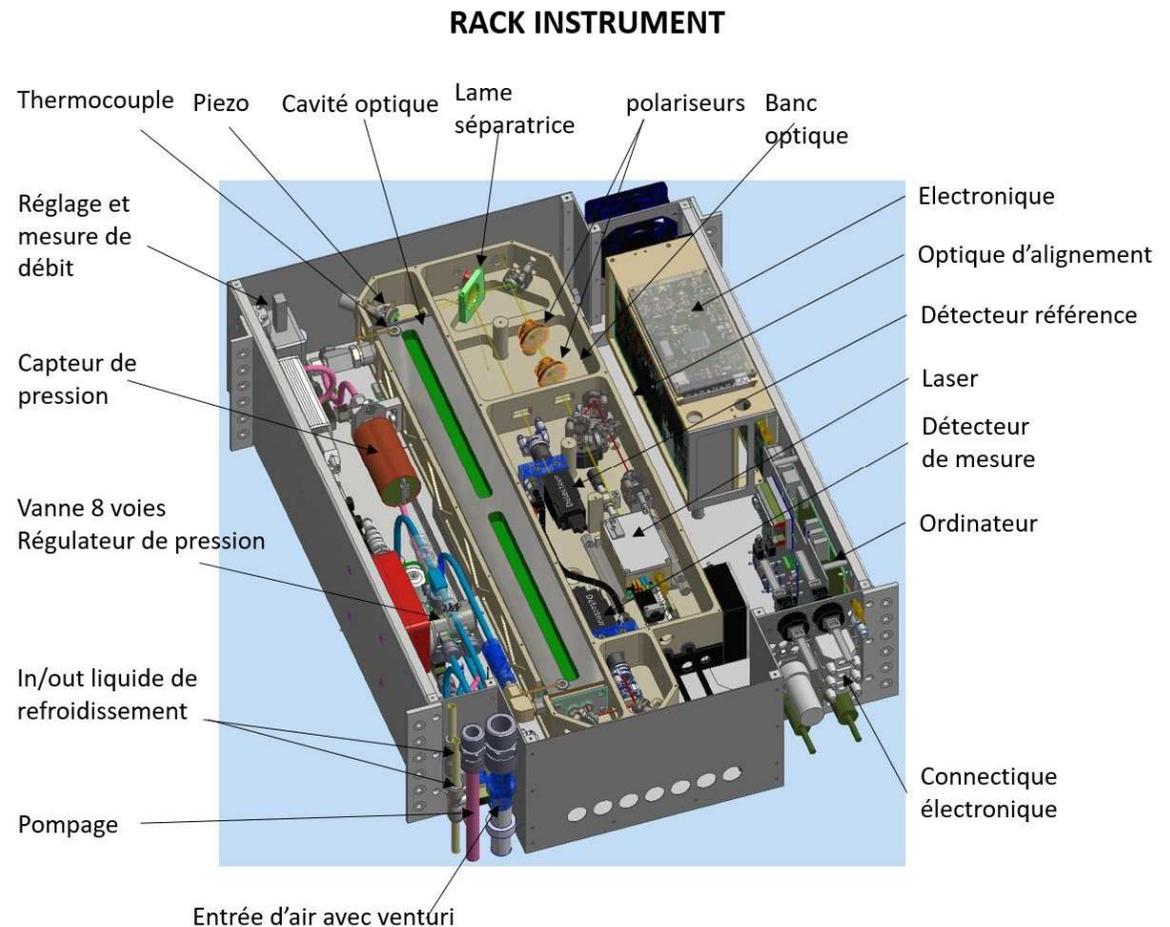
Description générale d'un rack

-Système Optique OFCEAS intégré dans un banc optique thermostaté à 45°C et suspendu sur des amortisseurs de vibrations

-Cavité résonante en inox électropoli traité SILCOSTEEL

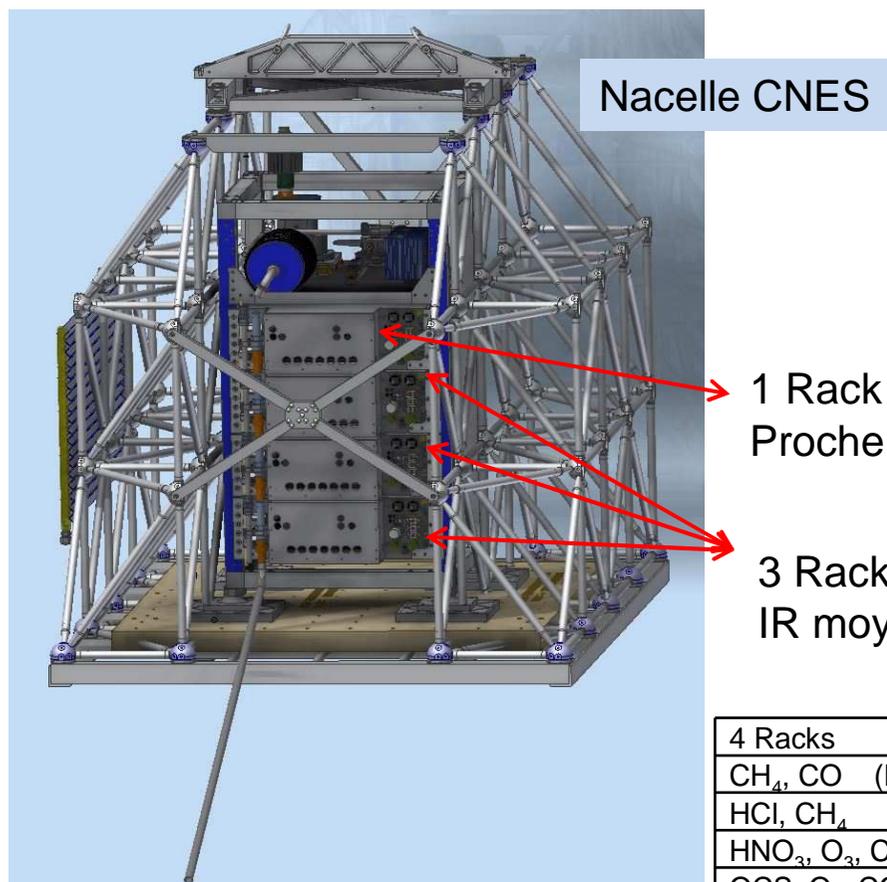
-Electronique en gamme étendue (-40, +70°C), numérisation des signaux à 1MHz-16bits. Asservissement numérique du contrôle de phase (piezo)

-4 modes d'admission d'air pour les basses (régulation de P à 50hPa) et les hautes altitudes (entrée directe à la PA), pour la calibration et la fermeture des circuits

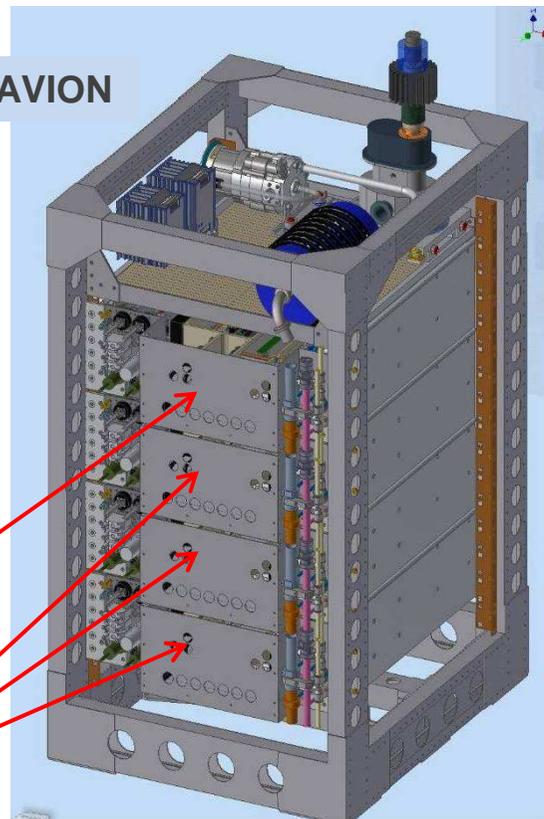


SPECIES: SPECTromètre Infrarouge à lasErs in Situ

Mesures avion & ballon
basse tropo à haute strato



BAIE AVION



1 Rack LIPHY
Proche IR

3 Racks LPC2E
IR moyen

4 Racks	longueur d'onde (μm)
CH ₄ , CO (LIPHY)	2,325
HCl, CH ₄	3,42
HNO ₃ , O ₃ , CH ₂ O, NH ₃	5,81
OCS, O ₃ , CO ₂	4,87



Conclusions:

- La conception d'un instrument pouvant être embarqué en avion et sous BSO doit prendre en compte les exigences de ces deux vecteurs dès le début du projet.
- L'adaptation d'un instrument avion au BSO est sans doute plus facile que l'inverse (au contrôle thermique et à la TM-TC près)
- Dans tous les cas il convient de prendre contact avec le CNES et SAFIRE dès le début de la conception.
- Le surcout financier et RH d'un développement prenant en compte les deux vecteurs se situe très à la marge du cout total du projet.

Dernières nouvelles de SPECIES

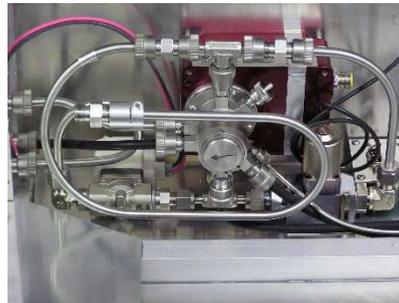
- SPECIES est actuellement en phase finale de construction.
- Des essais dans la chambre de simulation stratosphérique du CNES (SIMEON) sont programmés en janvier 2018.
- Le premier vol technologique sous BSO est prévu en août 2018 au Canada



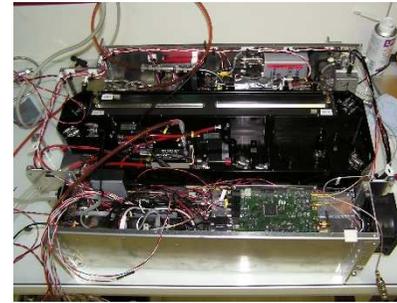
Electronique



Boitier laser



Vanne de répartition



Rack en cours de câblage



Baie ballon