

JCOM 2017, LIMOGES, 3 Juillet 2017

Les équipements optiques dans les futures charges utiles hyperfréquences des satellites

Jacques Sombryn

TéSA, Toulouse et Labex Sigma-Lim, Limoges

Remerciements

- Laurent Gatet, CNES
- Michel Maignan, TAS
- Michel Sotom, TAS
- Angélique Rissons, IASE SupAéro
- Olivier Llopis, LAAS
- Christelle Aupetit-Berthelémot, XLIM
- Cyril Decroze, XLIM

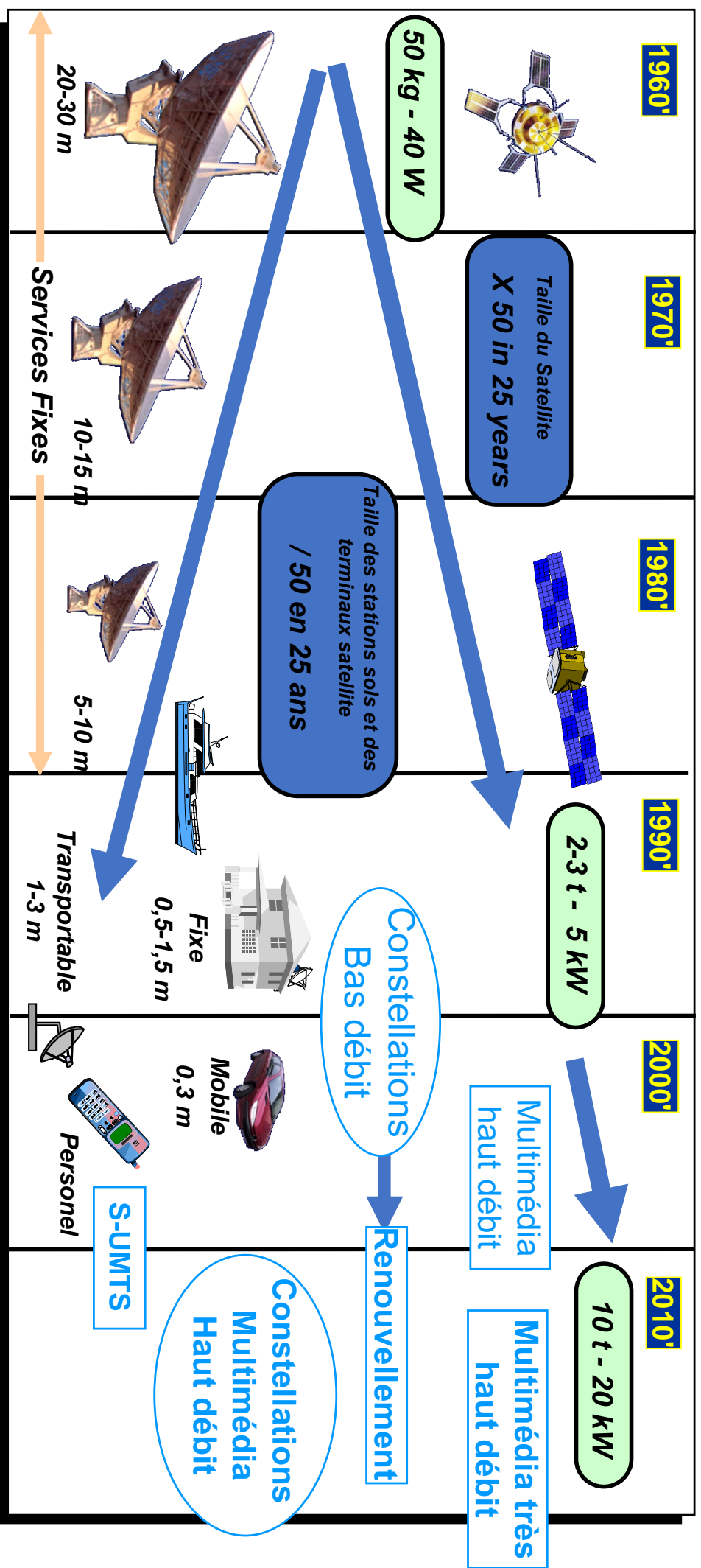
Sommaire

- Historique
- Evolution des satellites de télécommunications
- Besoins des futures charges utiles
 - Capacité
 - Flexibilité
- Besoins des liaisons de connexion et du segment sol
 - Capacité
 - Diversité de site et commutation
 - Possibilité de traitement du signal MIMO et pré-codage
- Solutions en cours d'étude
- Synergie hyperfréquences, optique et numérique
- Conclusion

Historique

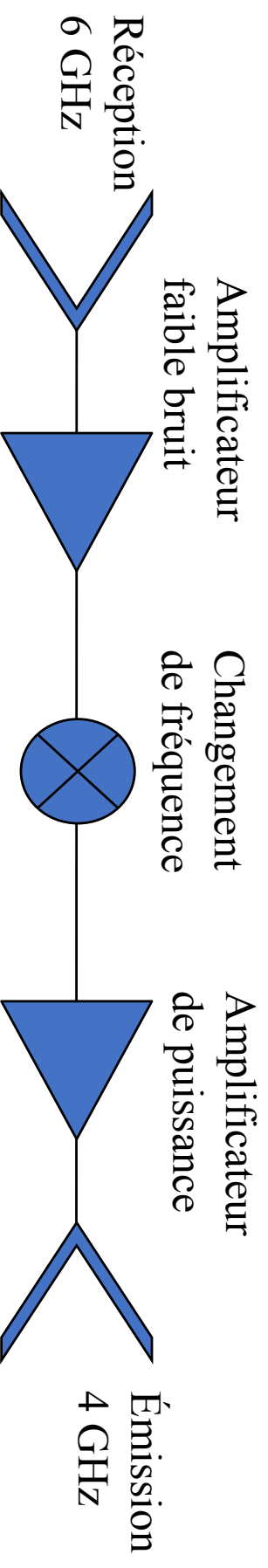
- Premier satellite artificiel Spoutnik 1957
- Premier satellite de télécommunication expérimental 1962, commercial 1965
- Augmentation des masses des satellites, de leur puissance DC et RF, du nombre de canaux et de leur capacité
 - Stabilisation 3 axes
- Passage aux modulations numériques (1990)
 - Satellites de TV directe, réception par les utilisateurs
- Plusieurs ruptures vers les années 2000
 - Constellations bas débit, forte diminution de taille des terminaux sol
 - Satellites multimédia (Internet) avec antennes multifaisceaux
 - Codes correcteurs d'erreur puissants : turbo-codes et LDPC
 - Adaptation de la modulation et du codage pour chaque utilisateur
 - Calcul de la capacité en ciel clair, pas de marge de pluie
- En cours
 - Satellites très haut débit
 - Satellites à moteurs entièrement électriques
 - Méga-constellations haut débit

Évolution des satellites et des terminaux



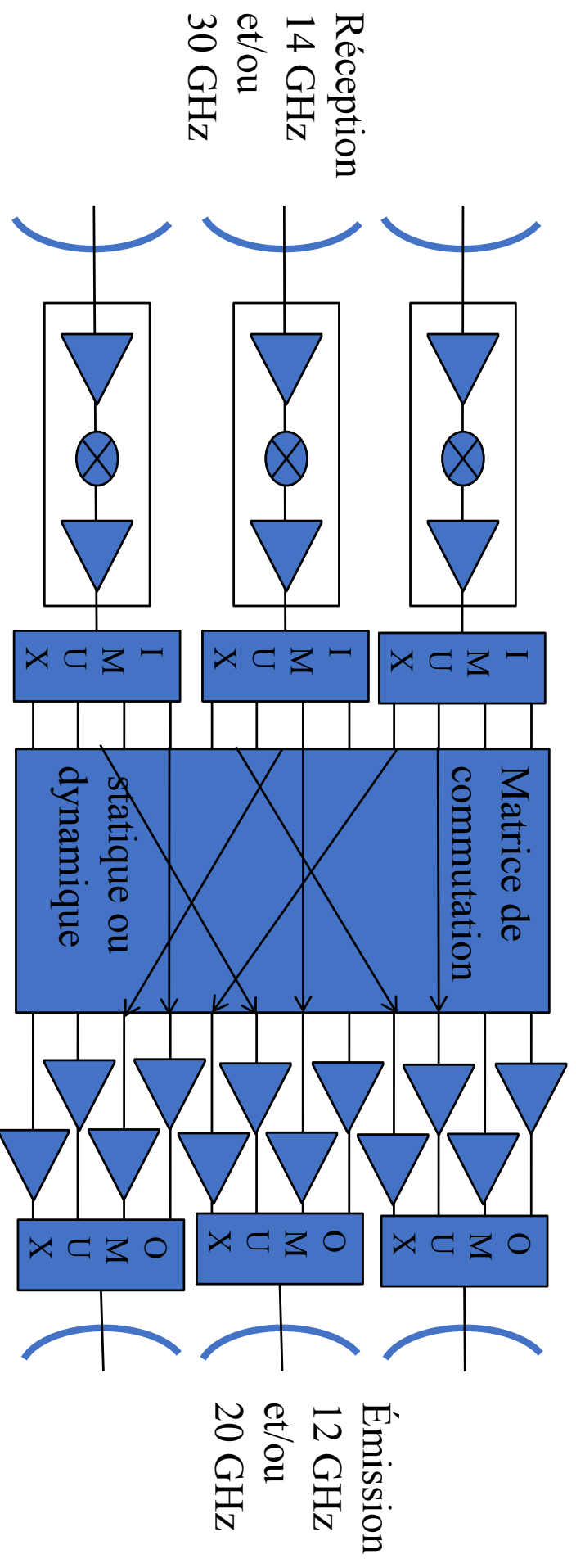
Évolution des charges utiles 1/3

- 1 ou 2 transpondeurs avec 2 antennes couvrant toute la Terre ou 1 continent chacune

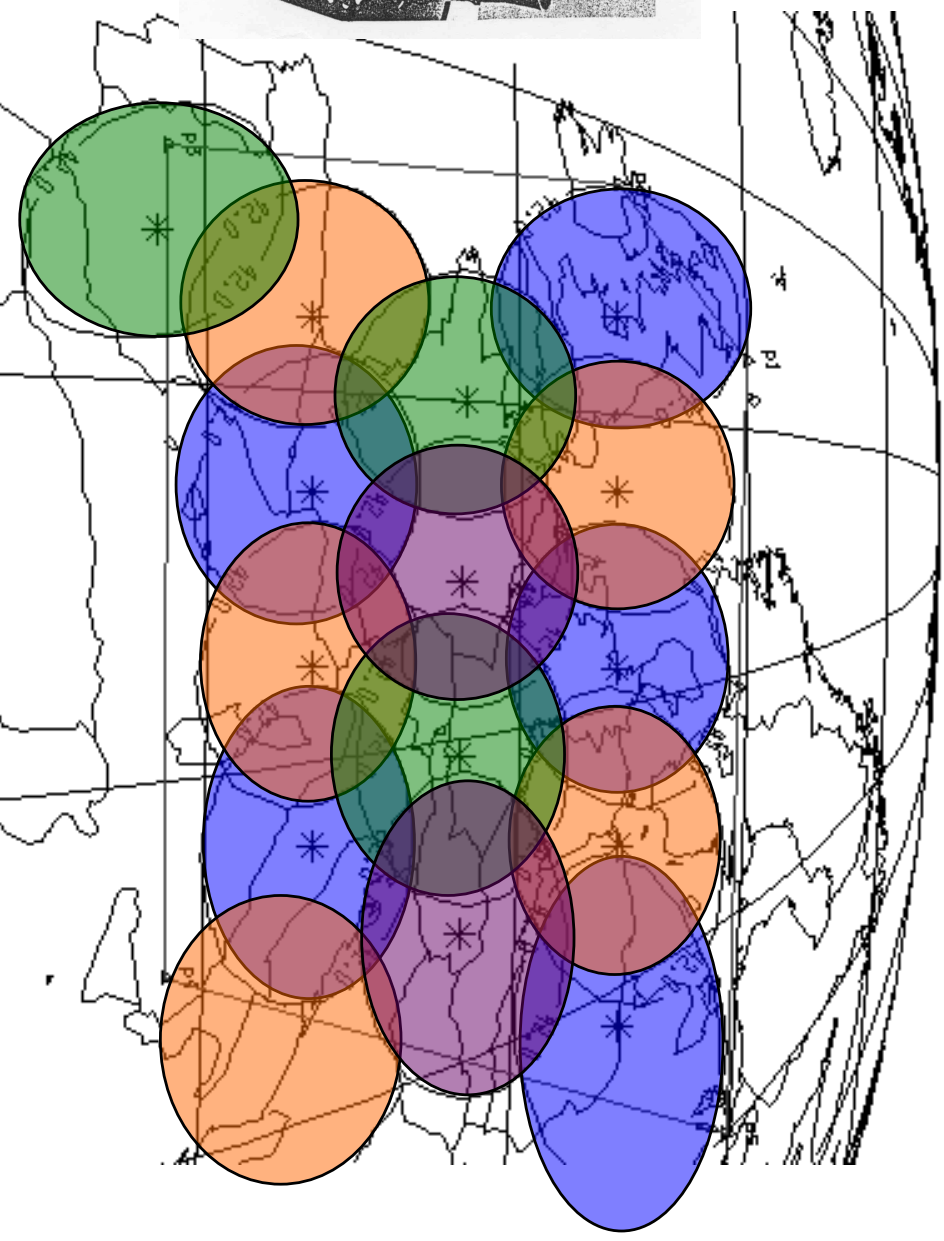
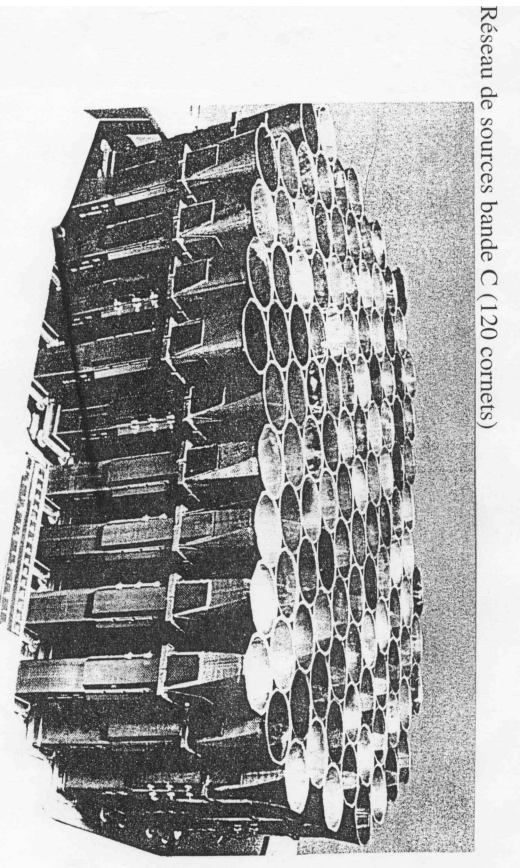


Évolution des charges utiles 2/3

- Augmentation du nombre de canaux par transpondeur (standard = 12 canaux de 40 MHz dans une bande de 500 MHz)
- Antennes dédiées (régions ou continents), lobes formés, utilisation des 2 polarisations, plusieurs transpondeurs, accès multiple FDMA, TDMA, CDMA, ...

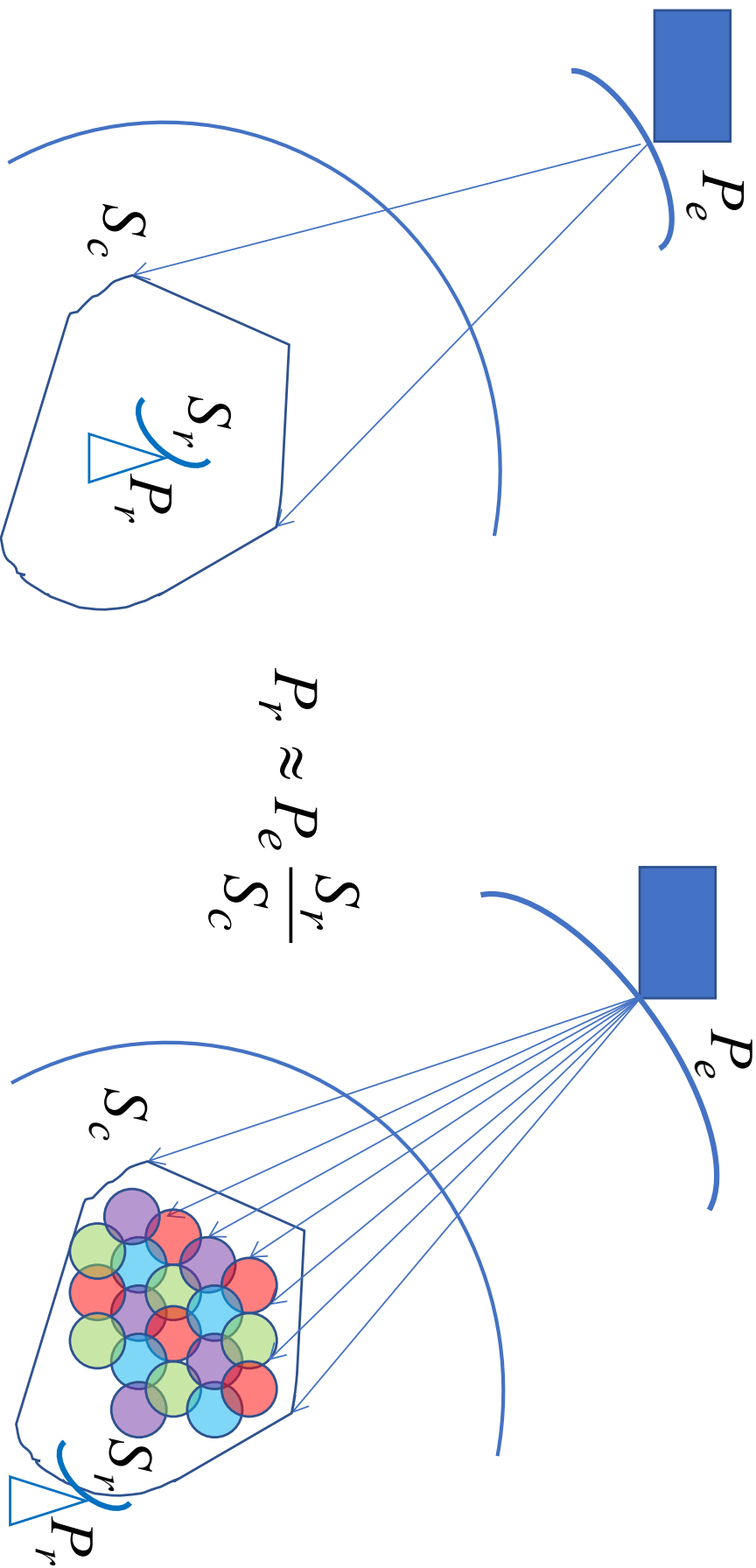


Antenne multifaisceaux



Chacune des 4 couleurs représente 1 bande de fréquence (sur 2) et une polarisation (sur 2)

Bilan de liaison en multifaisceaux



Même puissance totale d'émission mais antenne bord à 3 ou 4 réflecteurs de diamètre nettement plus grand, interférences, charge utile plus complexe, ... Intéressant si 20 faisceaux ou plus

multifaisceaux

1 ou 2 antennes émission et réception vers stations sol

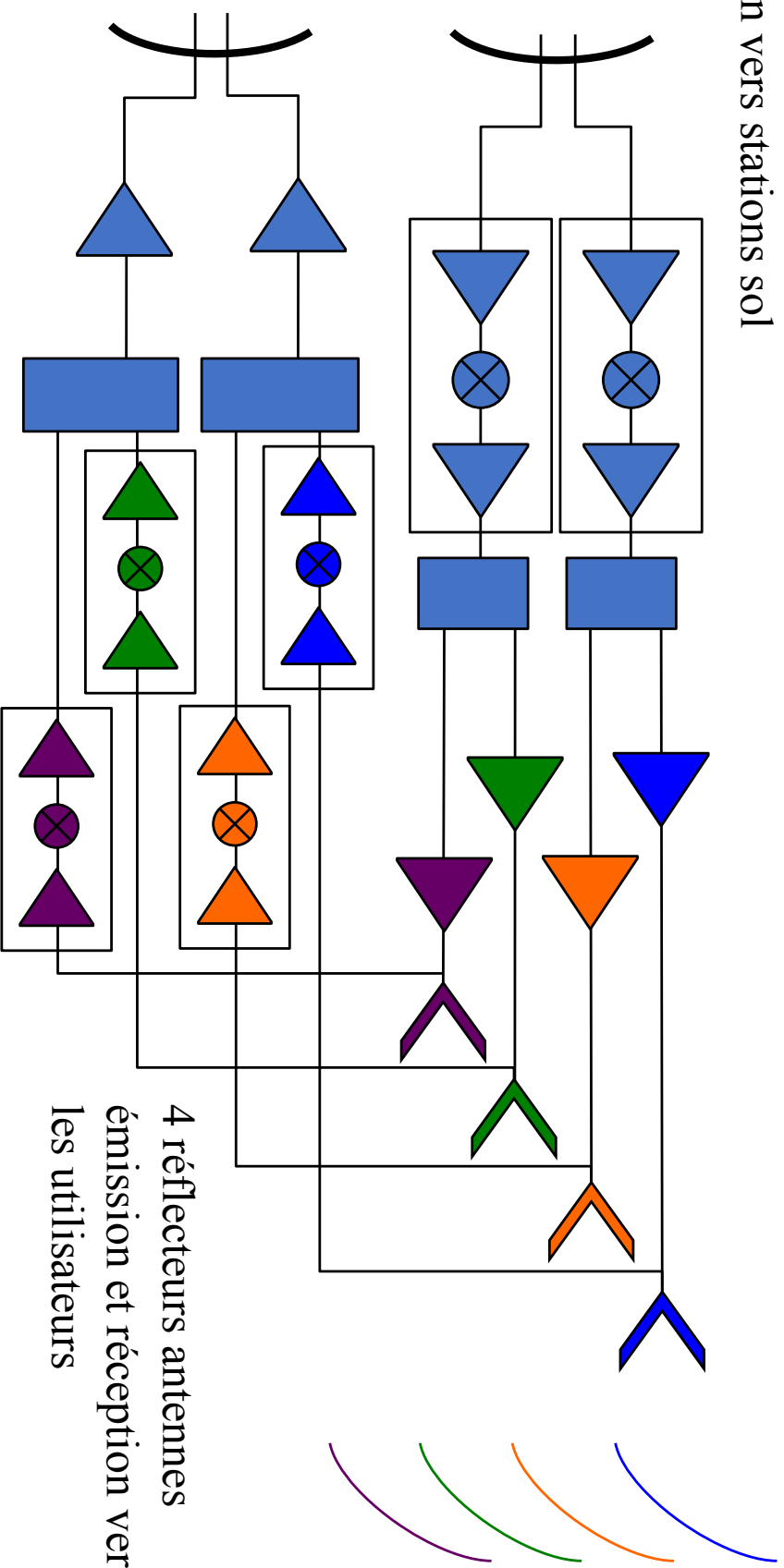
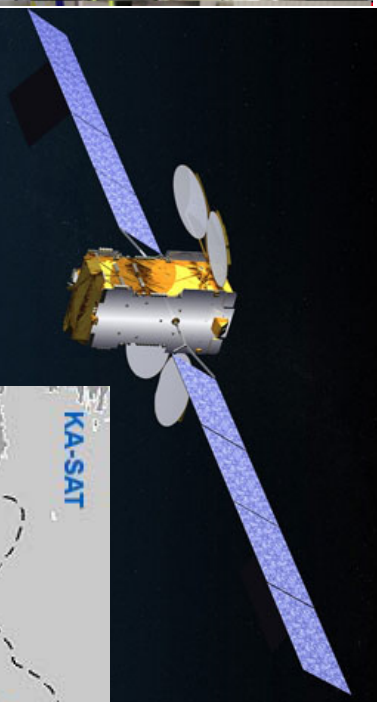
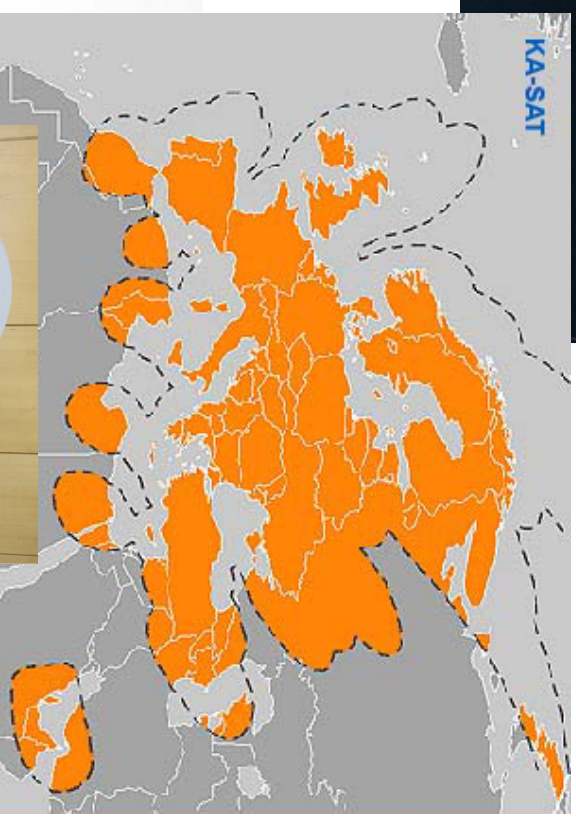
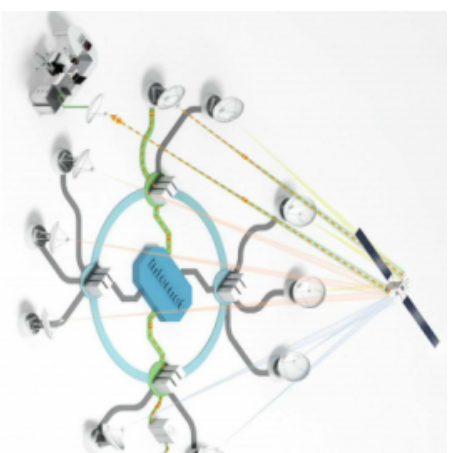


Schéma pour un seul motif de 4 couleurs, à multiplier par 5 à 20 ou plus

Système Ka-SAT (mise en service : juin 2011)

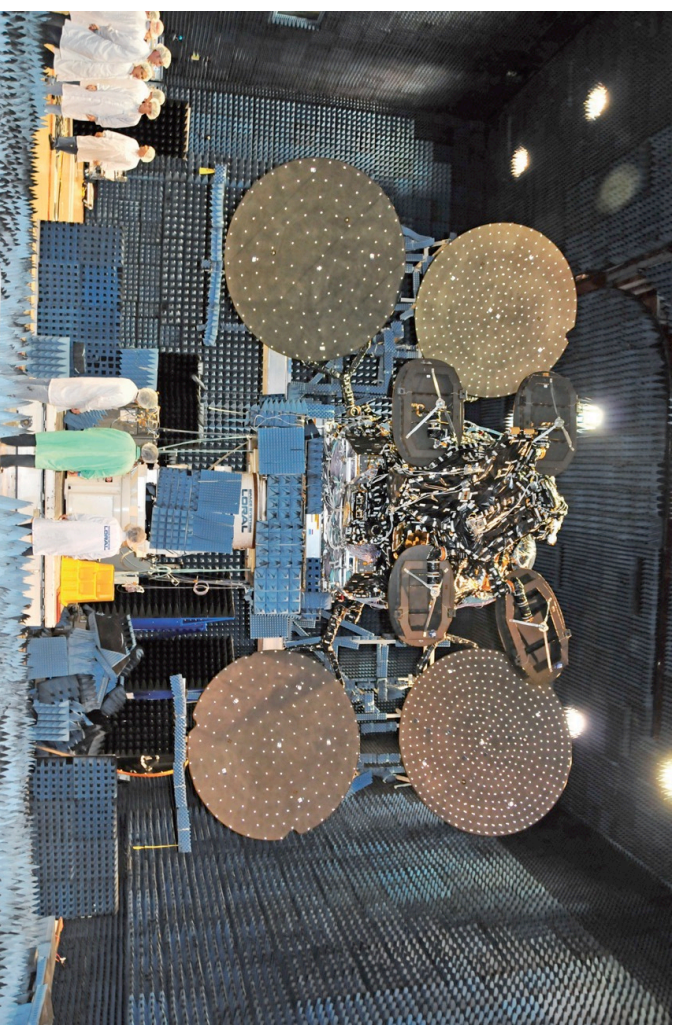
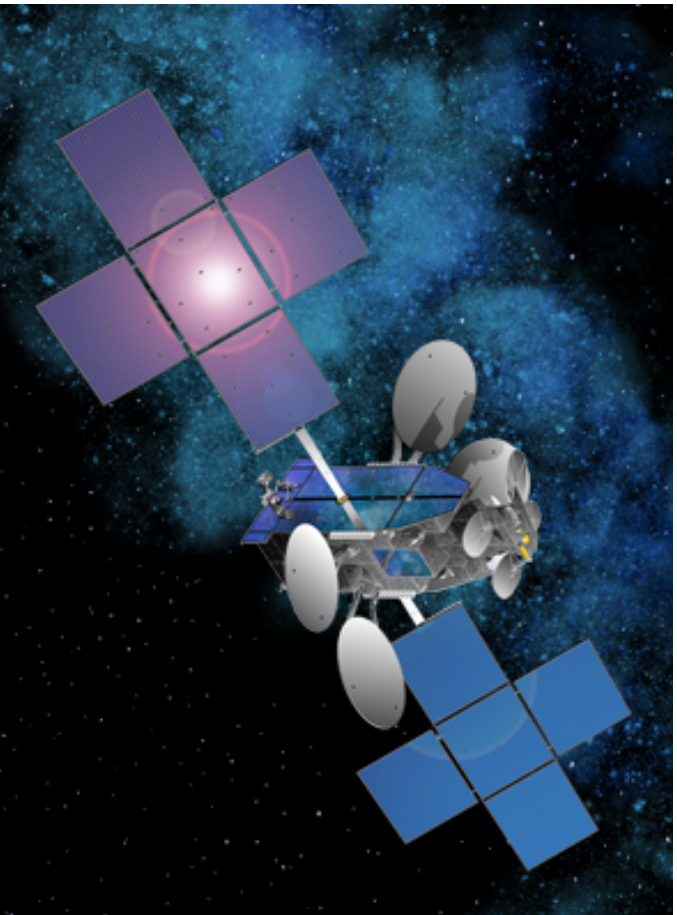


- Couverture Europe+ : 70 Gb/s
- Terminal bande Ka
 - Modem VIASAT 300 €
 - Abonnement 30 €/mois
 - Installé par l'utilisateur
- Satellite réalisé par Astrium à Toulouse
- Réseau sol fibre optique entre les stations de connexion



Viasat (mise en service : 2012)

- Même principe que Ka-SAT : multi faisceau en bande Ka sur les USA, même terminal utilisateur
- Capacité plus importante : 100 Gb/s



Augmentation de la capacité

- Utiliser toute la bande Ka (20-30 GHz) pour les utilisateurs, il faut alors passer les liaisons de connexion dans une autre bande ou en optique
- Utiliser des bandes passantes plus grandes en montant en fréquence vers 40/50 GHz pour les utilisateurs
- Augmenter le nombre de faisceaux et diminuer leur taille donc augmenter la taille des réflecteurs d'antenne (dépliable ou déployable, diamètre supérieur ou égal à 5 mètres)
 - Nécessité de passer à un seul réflecteur (max 2) au lieu de 4 ce qui augmente les interférences entre faisceaux
 - Complexité de la charge utile, plus de 200 chemins indépendants dans le satellite
 - Possibilité d'utiliser un support optique des signaux hyperfréquences pour limiter le nombre de chemins physiques
- Augmenter l'efficacité spectrale (bits/seconde/hertz) mais limitée par les interférences entre faisceaux de même couleur sauf si on sait les améliorer par traitement numérique
- Augmenter le nombre de satellites : constellation en orbite géostationnaire ou en orbite basse ou les deux

Augmentation de la flexibilité

- Les demandes des utilisateurs sont très différentes dans les différents faisceaux
- Certains faisceaux de Ka-Sat sont saturés alors que d'autres sont moins utilisés
- Une répartition flexible des ressources en bande passante et en puissance RF permettrait de transférer de la capacité depuis les faisceaux moins utilisés vers les faisceaux saturés (ou inversement de transférer les demandes des faisceaux saturés vers les faisceaux moins utilisés)
- Difficulté de réaliser cette répartition par filtrage variable
- Partage temporel plus flexible mais technologie complexe aussi
 - Ne doit pas augmenter les interférences entre faisceaux
 - Répartition entre faisceaux de la même couleur ?
 - Problème de la commutation rapide de fortes puissances
 - Même si on peut éventuellement arrêter l'émission pendant la commutation
 - Problème de la synchronisation des utilisateurs en l'absence de signal dans leur faisceau
- Intérêt des processeurs numériques pour la flexibilité
- Regain d'intérêt des antennes actives ou semi-actives
 - Possibilité d'utiliser un formateur de faisceau optique ou opto-hyper ou numérique
 - Support optique pour le transport des signaux hyperfréquences

Besoins des liaisons de connexion (gateways, feeder links)

- Les liaisons de connexion (entre stations sol et satellite) sont saturées aussi
- 10 stations en Europe en bande Ka (20/30 GHz) pour Ka-Sat pour 70 Gb/s
- Il faudra monter en fréquence pour laisser toute la band Ka aux liaisons utilisateurs
- Bandes de 2,5 GHz autour de 40 et 50 GHz envisagées mais limite pour 1 Tb/s
- Liaison optique en espace libre pour le futur
- Principal problème dans les deux cas : la diversité de site nécessaire pour garantir la disponibilité en cas de nuages ou de pluie
- Besoin d'un réseau fibre optique au sol et de commutations très rapides entre une station et une autre sans perte de la synchronisation des utilisateurs
- Si on utilise une seule liaison de connexion pour toute la capacité du satellite, on peut en profiter pour améliorer très fortement l'efficacité spectrale par un traitement numérique des liaisons utilisateurs pour diminuer les interférences entre faisceaux : traitement MIMO à la réception dans la station et pré-codage avant émission par la station
- Revient à améliorer les diagrammes des antennes utilisateurs du satellite et à modifier leur faisceau au sol. On les transforme en antenne semi-actives et on réalise de la formation de faisceaux dans l'espace des faisceaux (beamspace MIMO)

Quelques solutions en cours d'étude

- Support optique des signaux hyper
 - En guide ou en espace libre
- Génération optique de signaux d'oscillateurs locaux
- Conversion de fréquence multiple
- Échantillonnage optique de signaux hyper
- Formation de faisceaux d'antennes réseaux ou actives
- Transport de données dans les processeurs numériques
- Réseau sol en fibre optique

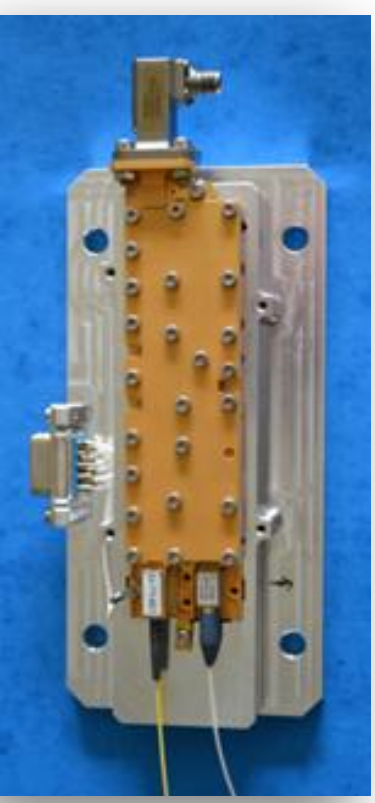
Support optique des signaux hyper

- Dans les transpondeurs
- Entre les antennes et les transpondeurs
- Dans les formateurs de faisceaux d'antennes actives
- Dans les commutateurs à grand nombre d'entrées-sorties (100 et plus)

Transport optique de signaux hyper

Exemple tête de réception Ka-FI, transport de l'OL et de la FI par fibre optiques entre l'antenne multifaisceaux et le répéteur

- Compact receiver front-end array assembly
- Excellent RF performance (gain, NF linearity ...)
- Low power dissipation in the focal plane
- Well-suited for remote links to antenna elements
- Excellent phase stability performance



Commutation optique 1D, 2D ou 3D

- 1 x N et assemblage
- 2D cross-bar
- 3D MOEMS ou piézo-électrique

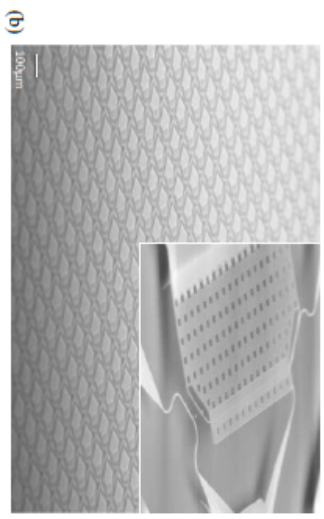
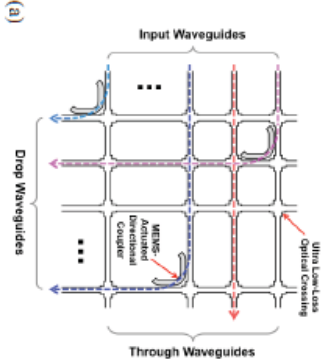
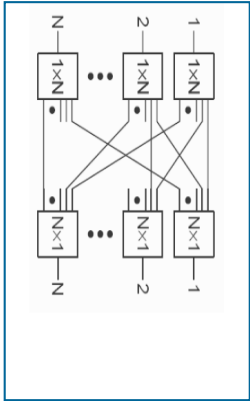
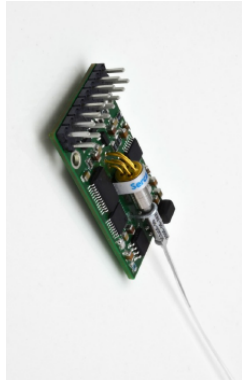
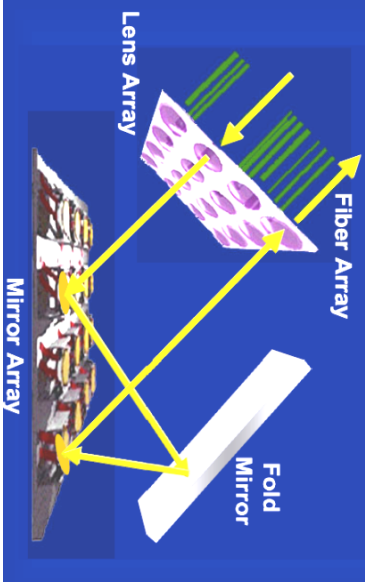
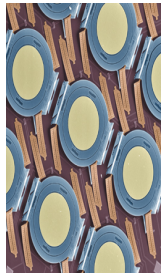
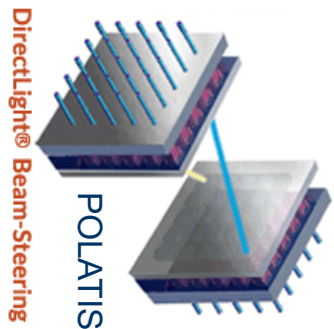
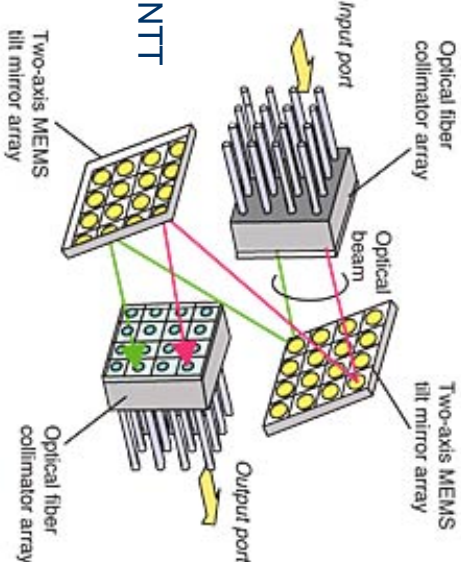


Fig. 1. (a) Schematic of the $N \times N$ passive optical crossbar switch with MEMS-actuated directional coupler switching elements. (b) Scanning electron micrograph (SEM) of the OCS. The inset shows the close-up view of the directional couplers and intermediate coupling waveguides on a MEMS cantilever.



GLIMMERGLASS



Génération optique d'OL



Photonic FGU unit breadboard



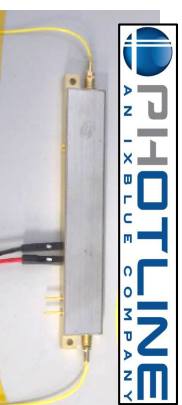
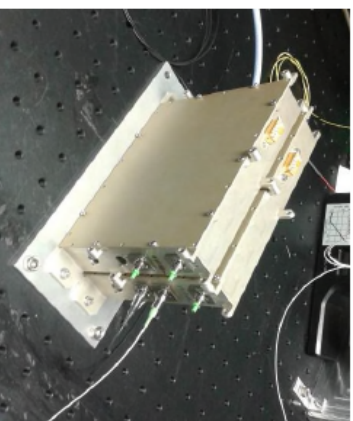
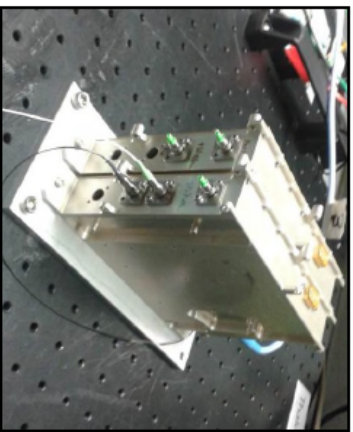
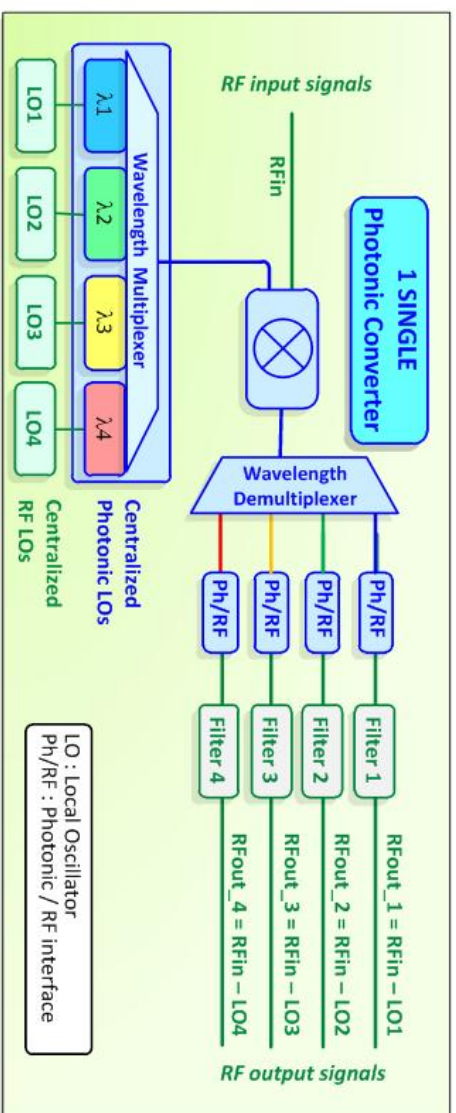
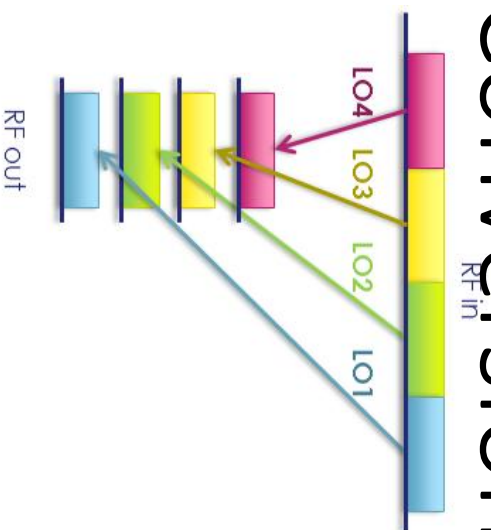
Single LO optical spectrum

- 5 LO's based on WDM
- high-power optical amplifier for delivery to photonic converters
- breadboard model using commercial components

Conversions de fréquences multiples

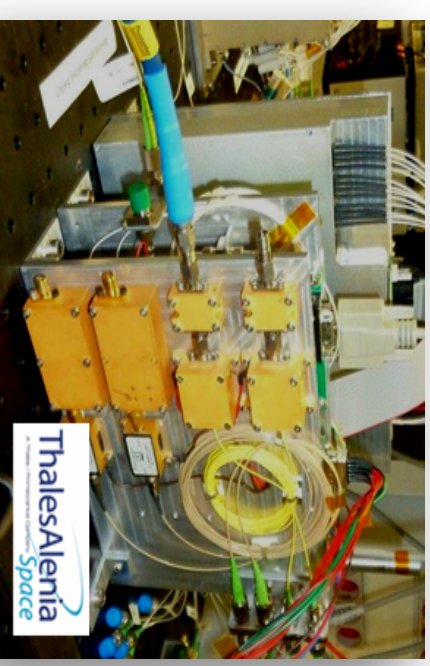
- Le transport des signaux hyperfréquences en analogique sur un support optique permet un multiplexage en longueurs d'onde et une conversion de fréquence par des fréquences d'oscillateurs RF multiples, chacun porté par une raie optique
- Les différents mélanges sont à des longueurs d'ondes optiques différentes et peuvent être choisis par des filtres optiques

Conversions de fréquences multiples

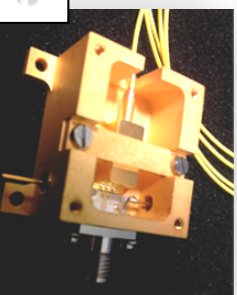


Dual-channel, optical multi-frequency mixing slices

Customized EO modulator



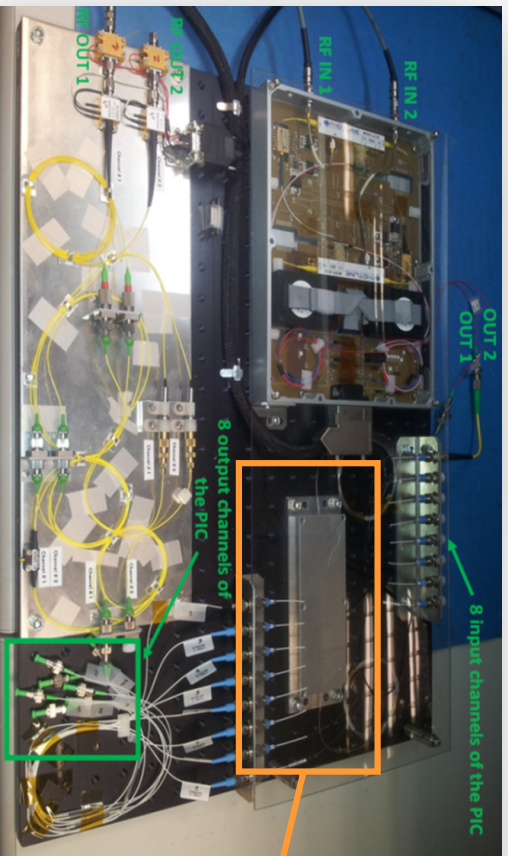
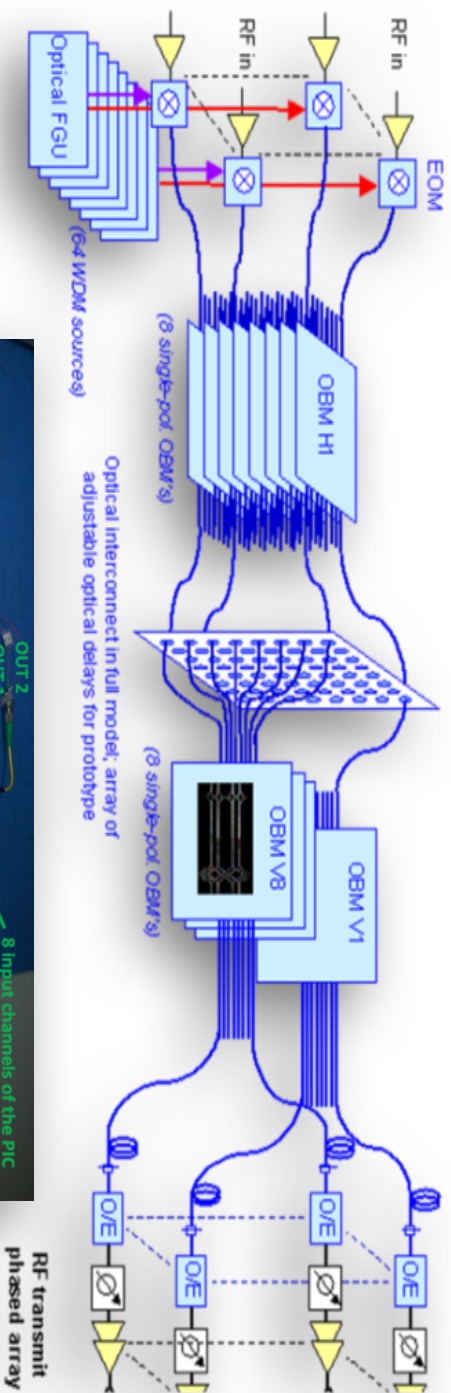
Wavelength selective switch breadboard



Ka-band O/E detectors

Formateur de faisceaux antenne active

- Réalisation d'une matrice de Butler 8x8 en fibre optique



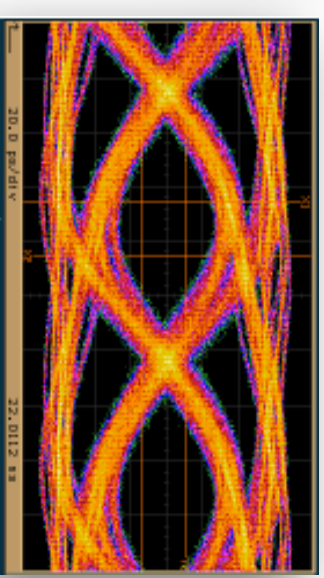
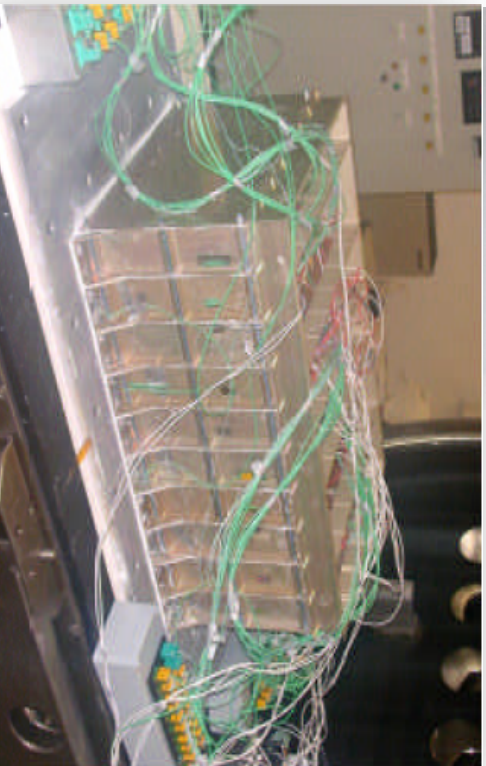
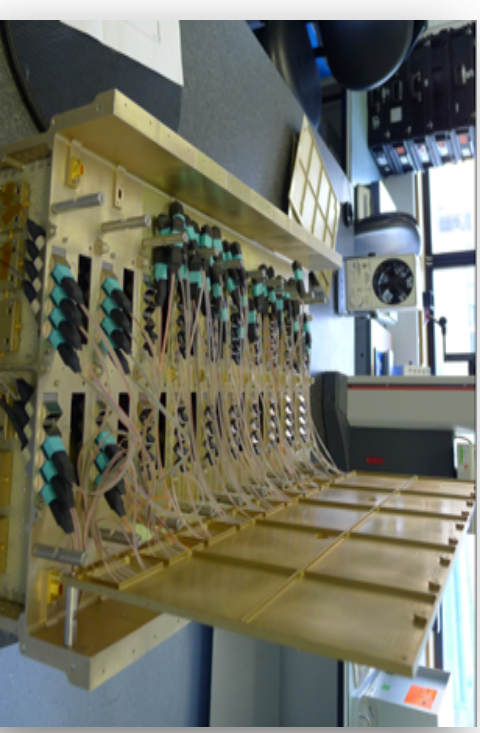
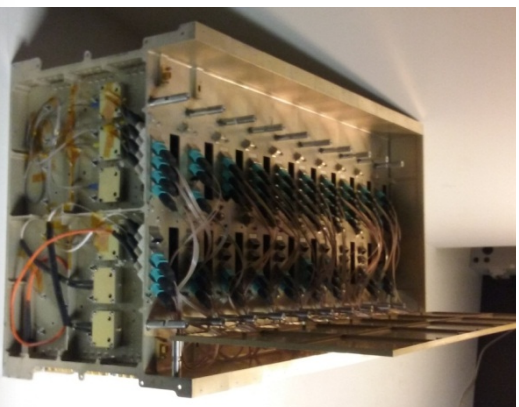
DAS
Photonics



Transport de données dans les processeurs numériques

- Même si on ne traite pas l'ensemble des 1 Tb/s, le flux est trop important pour utiliser des liaisons électriques entre les cartes du processeur numérique et entre les processeurs s'il y en a plusieurs
- Passage par des liaisons de données optiques
- Commutation et redondance facile à intégrer

Transport de données dans les processeurs numériques



Comparaison des performances

- Performances meilleures : EMC
- Performances des fonctions optiques qui nécessitent d'optimiser l'architecture :
 - Dynamique
 - Facteur de bruit (40 dB)
 - Puissance maximale (ampli 1 watt, diode environ 0,1 watt)
 - Stabilité en température et dans le temps des fonctions actives
 - Rendement
- Performances meilleures en optique si intégration de plusieurs fonctions hyper dans une fonction optique :
 - Masse, encombrement, coût
 - Consommation

Fiabilité

- Temps moyen de bon fonctionnement :
 - 1 million d'heures : très largement insuffisant
 - Équivalent à 100 ans donc plusieurs pannes par an si la charge utile comprend plusieurs centaines de chemins optiques
 - Il faut redonder tous les équipements et liaisons
 - Il faut viser 100 millions à 1 milliard d'heures, ce qui est équivalent à un câble coaxial ou un filtre hyper
- Tenue aux radiations
 - Noircissement des fibres dopées erbium

Projet NIMPH

Nano-satellite to Investigate Microwave Photonic Hardware

- **Contexte**
 - L'opto-microonde (photonique) est envisagée pour contribuer aux traitements des signaux RF à bord des futures charges utiles des satellites télécom,
 - Génération et distribution d'oscillateurs locaux par fibres optiques,
 - Conversion de fréquence RF par voie optique,
 - Routage de signaux RF via des porteuses optiques, etc.,
 - Elle fait l'objet depuis de nombreuses années d'efforts de R&D,
 - Mais il s'agit d'une technologie de rupture, et son développement est freiné par l'absence de retour d'expérience en vol.
- **Objectifs techniques**
 - Définir une charge utile expérimentale, basée sur des technologies opto-microondes, embarquables sur un CubeSat 3U pour tester la sensibilité aux radiations de composants critiques en particulier les fibres optiques amplificatrices (EDFA).
 - Evaluation des possibilités offertes par un CubeSat 3U,
 - Conception préliminaire d'une charge optique opto-RF,
- **Objectifs pédagogiques**
 - Souhait du monde académique et du CNES de mettre en place en France une filière de construction de nanosatellites à des fins éducatives.
 - Voir sur le web projet JANUS du CNES http://userpages.irap.omp.eu/~dtoubianc/Nanosatellites_Etudiants_V2.pdf
 - Souhait de l'industrie spatiale d'attirer des jeunes vers ses métiers.

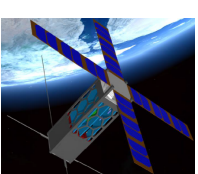
Une expérimentation sur un nanosat, réalisé en milieu académique permet de combiner des objectifs techniques et des objectifs de formation et d'obtenir un certes modeste, mais néanmoins premier retour d'expériences en vol.

Projet NIMPH



Nano-satellite to Investigate Microwave Photonic Hardware

- **Le satellite**
 - CubeSat 3U (10 cm x 10 cm x 33 cm), 4 kg, 22 W, radio bande 144 et 432 MHz.
 - Orbite de conception : circulaire 680 km, inclinaison 98 ° ,
- **La charge utile**

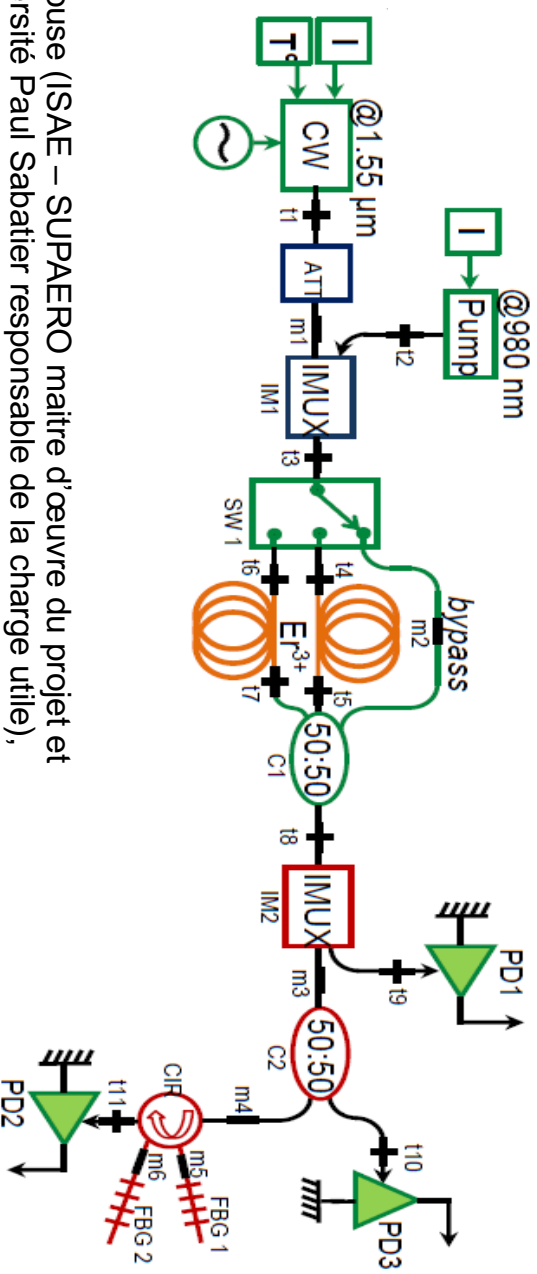


Film_NIMPH.m4

- Mesurer les dérives affectant des composants photoniques au cours d'un vol d'au moins 1 an et plus particulièrement deux fibres amplificatrices,
- Mesurer la dose cumulée de radiations reçues et leur énergie, évaluée à 20 krad sur 2 ans et corrélée avec la dérive des composants.

Synoptique de la charge utile

à la fin de la phase A, maquette et mesurée par des étudiants d'UPS dans les locaux du LAAS.



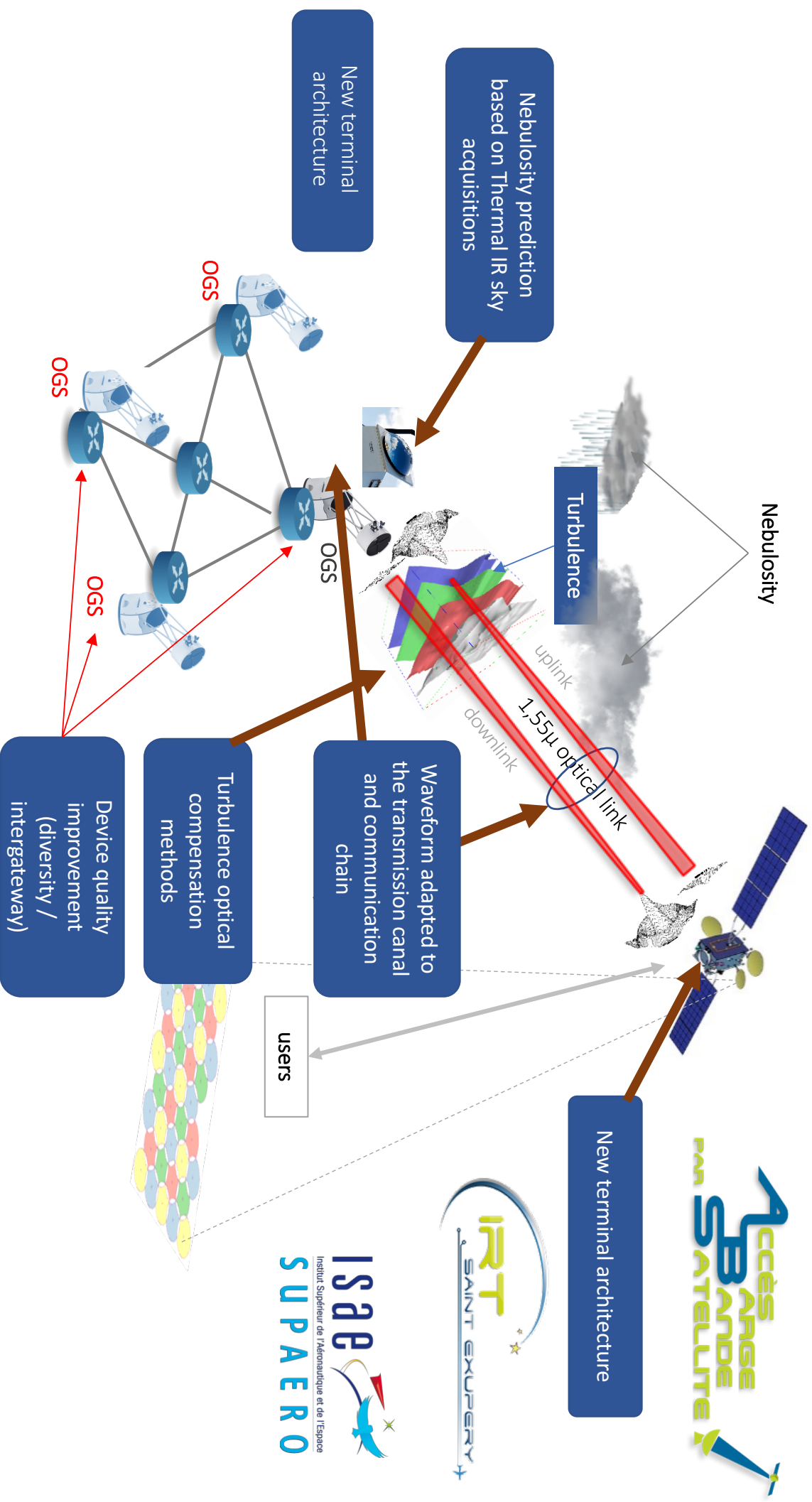
- **Les partenaires et soutiens**
 - Le Centre Spatial Universitaire de Toulouse (ISAE – SUPAERO maître d'œuvre du projet et responsable de la plate-forme et l'université Paul Sabatier responsable de la charge utile),
 - Le LAAS encadrement étudiants et moyens de laboratoire,
 - Thales Alenia Space, expertise technique et responsable de la spécification de la mission.
 - CNES (programme JANUS), CERN, ONERA, TRAD (expertise radiation),
- **Status**
 - Projet en phase B, satellite prêt au lancement au dernier trimestre 2020.



Liaisons optiques en espace libre

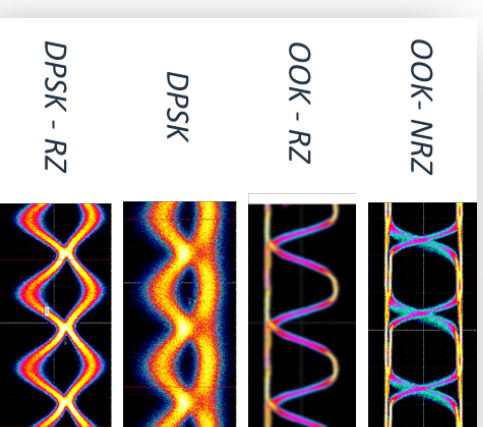
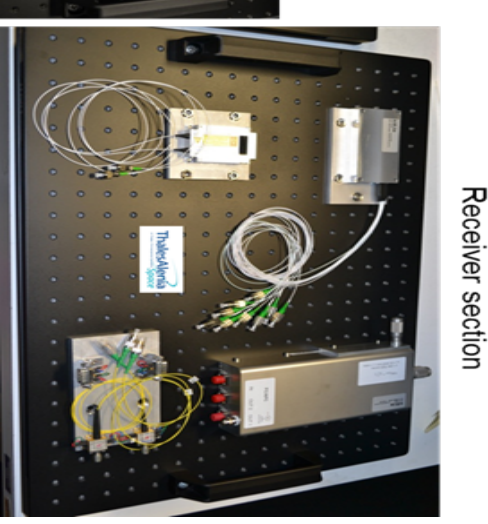
- On utilise une seule liaison montante-descendante pour l'ensemble du flux de 1 Tb/s
- Disponibilité nécessaire de 99,9% à 99,99% soit indisponibilité max de 1 heure à 10 heures par an
- Problème des nuages et de la turbulence :
 - Prédiction
 - Correction
 - Diversité de site et commutation
- Nécessite jusqu'à une dizaine de stations bien réparties et un réseau sol en fibre optique

Liaisons optiques en espace libre



Liaisons optiques en espace libre

- Development of a breadboard featuring most critical parts of a FSO communication system
 - Nx10Gbps, DWDM optical communication chain based on 1.5 μm technology
 - Optical telecom chain only at this stage@ 1550 nm, but with potential for upgrade and implementation of additional subsystems
 - To be delivered to IRT St-Exupéry
- Demo and assessment of BER and detection sensitivity performance with various modulation formats and detection/demodulation architectures (OOK, DPSK, NRZ/RZ...)



Réseau sol en fibre optique

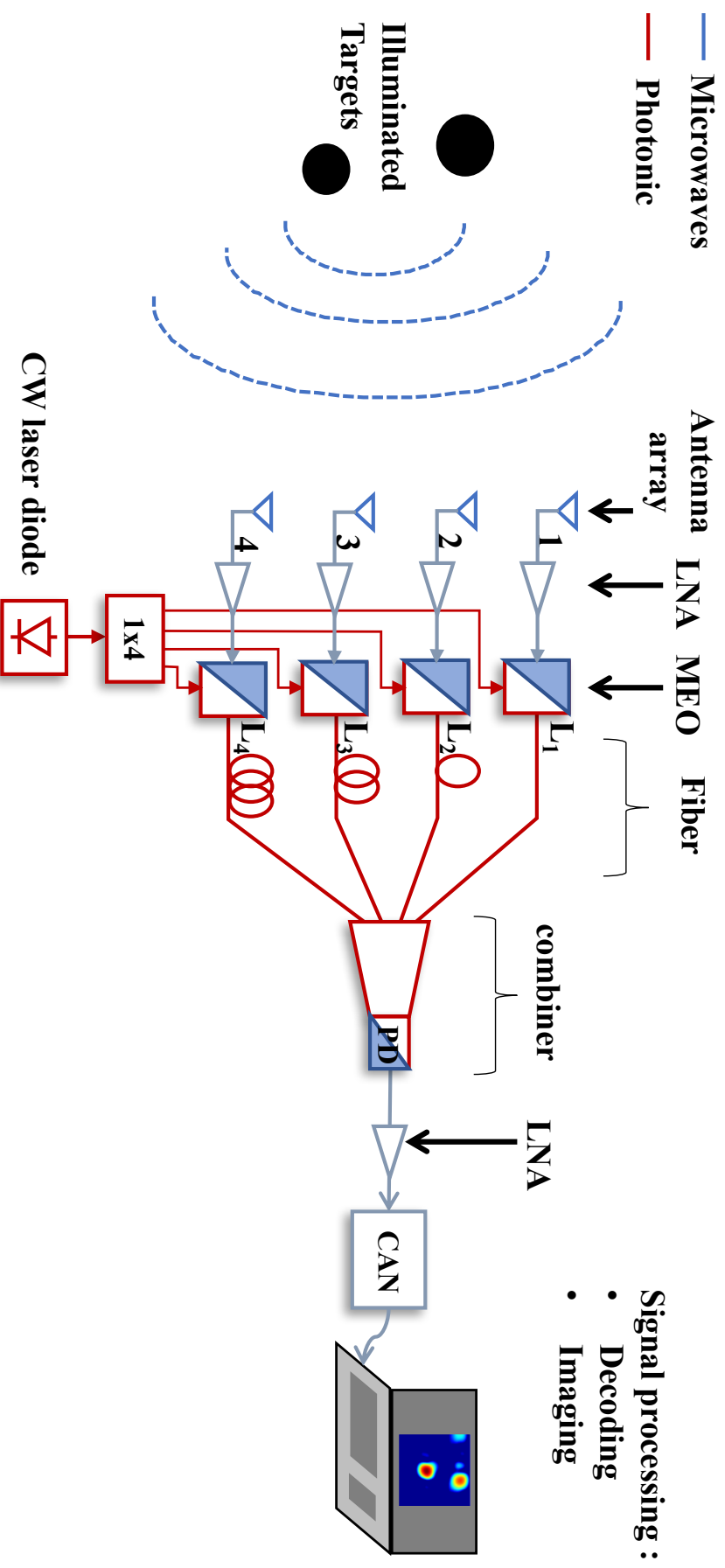
- Trois possibilités :
 - Transport des données entre Internet et stations de connexion, modulation RF dans la station de connexion
 - Transport en analogique de signaux hyperfréquences modulés
 - Transport en numérique de signaux hyperfréquences modulés
- Points importants :
 - Capacité 1 Tb/s
 - Commutation rapide sans perte de synchronisation pour la diversité de site
 - Déploiement , accès aux nœuds du réseau internet
 - Coût

Compétition ou synergie entre numérique et optique

- Certains des équipements hyperfréquences des charges utiles pourraient être remplacés par des équipements optiques ou des équipements numériques
- Flexibilité et granularité du filtrage et du traitement du signal en numérique (commutation au niveau messages, démodulation et modulation, linéarisation, ...) éventuellement reconfigurable en orbite
- Forte capacité des liaisons optiques, simplification des topologies à grande échelle et commutation d'un très grand nombre de signaux analogiques

Synergie en imagerie opto-hyper

Expérimentation Labex Sigma-Lim, fonctions hyper, fonctions optiques et traitement du signal numérique



Conclusion

- L'augmentation des besoins de capacité et de flexibilité prévus pour les futures charges utiles très haut débit ouvre des opportunités pour des solutions en rupture
- L'optique en espace libre et l'optique guidée ont une place possible dans ces nouveaux systèmes
- Une synergie avec les solutions hyperfréquences et numériques sera nécessaire pour répondre aux besoins de ces systèmes