

# Vers des avions connectés par liaison optique

**Béatrice Sorrente**

**12 décembre 2017**

**ONERA 29 avenue de la Division Leclerc**

**92322 Châtillon**

**01 46 73 48 53**

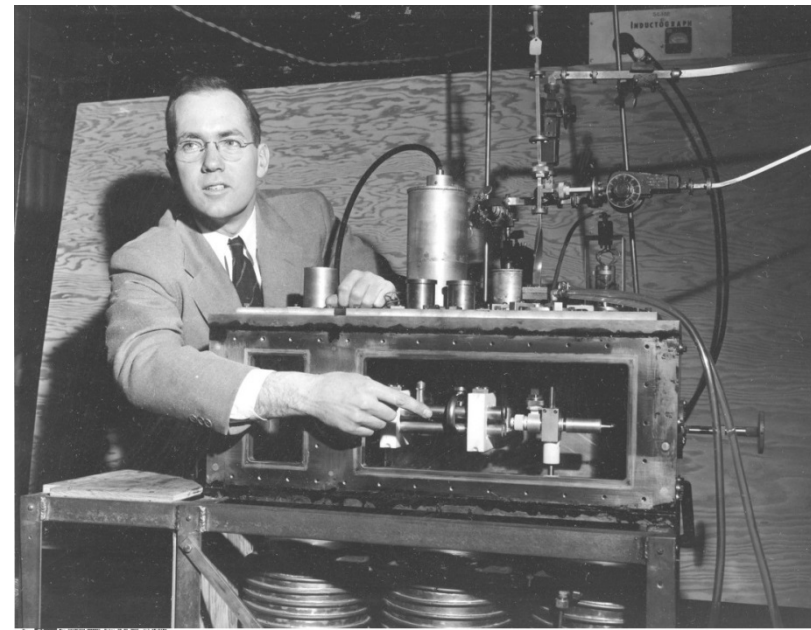
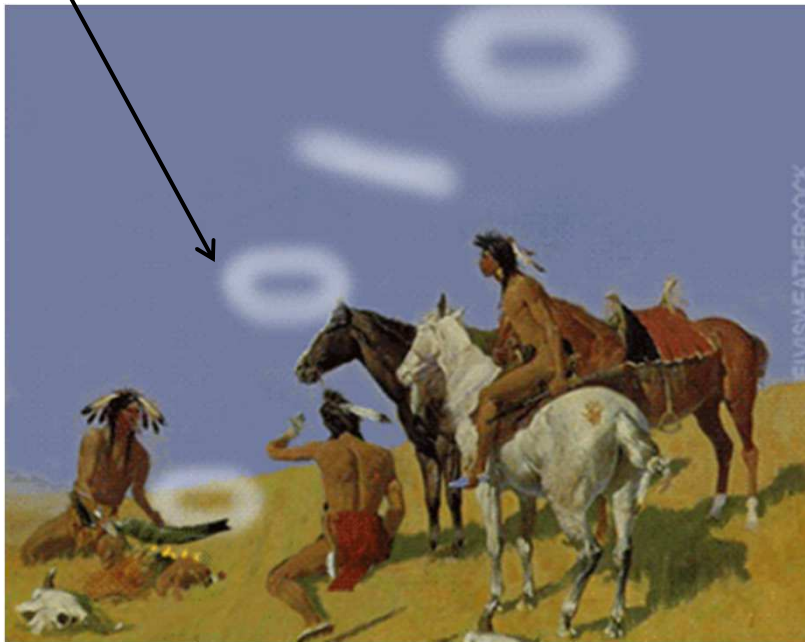
**Email : [beatrice.sorrente@onera.fr](mailto:beatrice.sorrente@onera.fr)**



**retour sur innovation**

# Les liaisons optiques sans fil : un moyen de communication très ancien

Message codé



En 1954 Charles Townes met au point l'Amplification de lumière par effet stimulé de rayonnement : LASER

# Des innovations technologiques déterminantes

Années 80 : Laser à semi-conducteur très compact !

Laser à amplificateur fibré très directif (Laser Ytterbium,... )

Emergence des lasers à cascade quantique (Térahertz, IR)

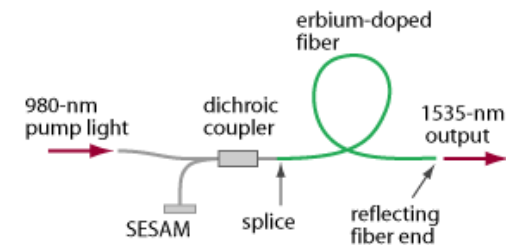
= sources modulables à très haute fréquence  $\Rightarrow$  Très haut débit

Technologie détecteur  $\Rightarrow$  Limitation de la bande passante à 10 GHz

Photodiodes à avalanche à comptage de photon (bande IR)  $\rightarrow$  10 GHz (Leti CEA) ,  
20 à 40 GHz ? (HgCdTe APD for high data rate FSO | Johan Rothman | 8/2/2017)

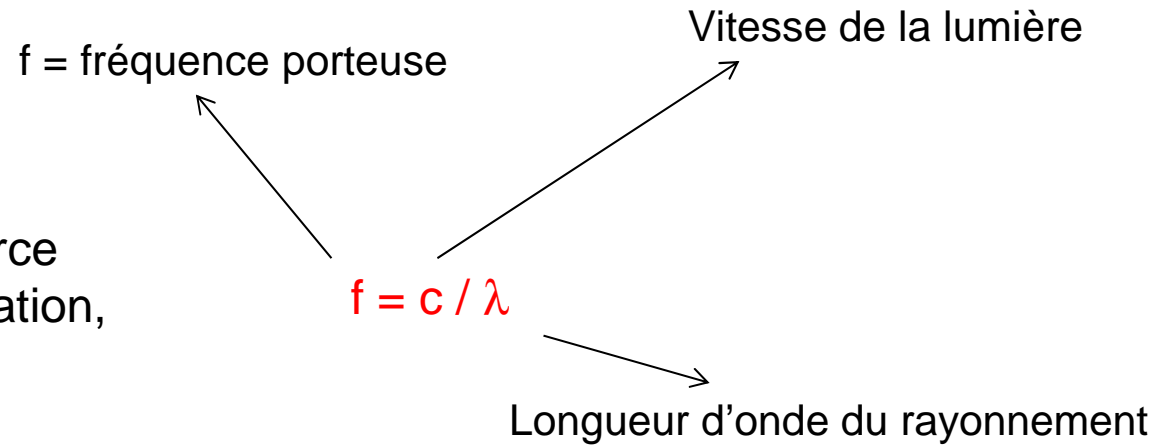
L'innovation technologique  $\Rightarrow$  Accroissement des débits (optique, THz)

Augmentation du débit par multiplexage et détection cohérente  $\rightarrow$  > 1 Tbps

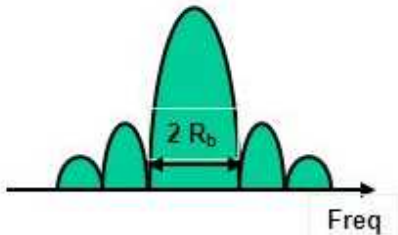


# Impact de la longueur d'onde sur le débit

Modulation du signal de la source  
(intensité, phase, polarisation,  
fréquence)



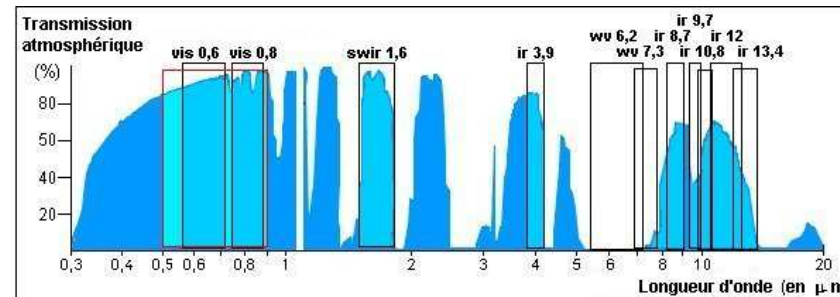
Spectre d'un signal binaire  
(80% puissance dans  $2 R_b$ )



La fréquence porteuse doit être très  
supérieure à l'occupation spectrale  
( $F_c \gg 2 R_b$ )

$$f \gg 2 R_b$$

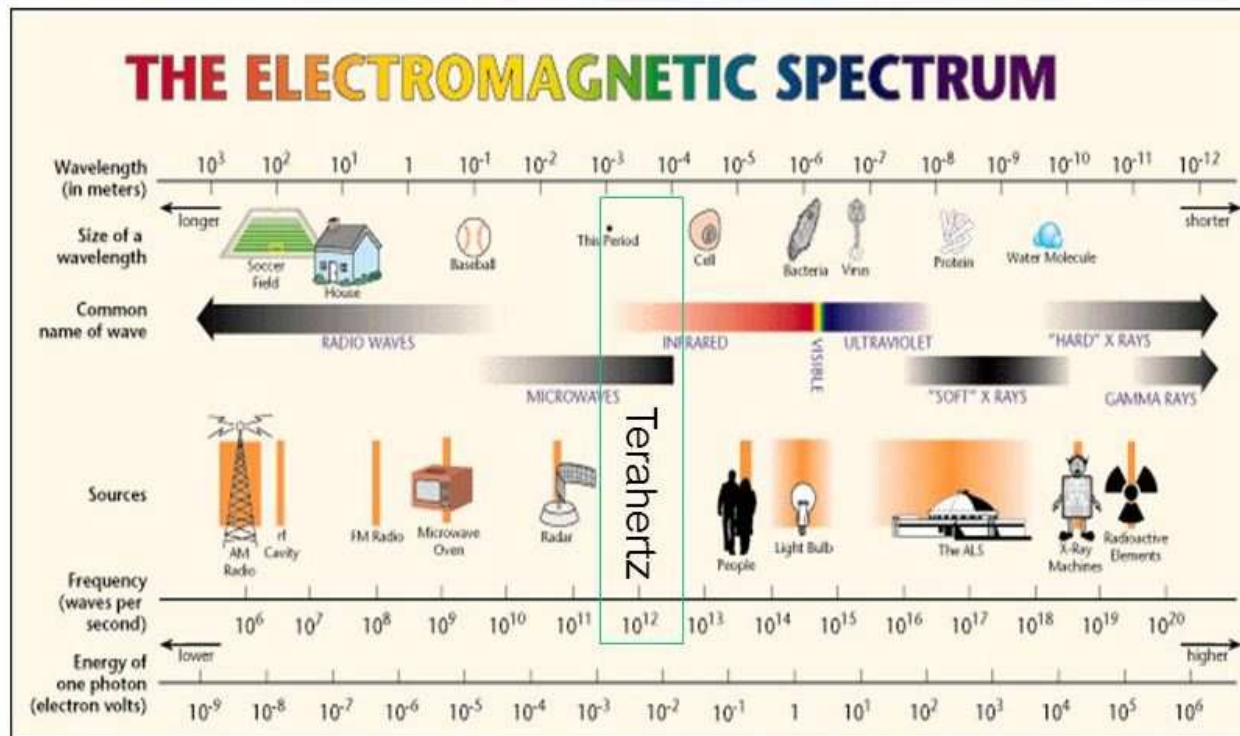
Accroissement de la fréquence porteuse  $f$   
 $\Rightarrow$  Accroissement du débit



Choix de  $\lambda$  contraint par la transmission atmosphérique

# Des débits très élevés dans le domaine optique

## Caractérisation mm – THz – Optique ...



Domaine radiofréquence

$f = 1 \text{ GHz} \Rightarrow$  qqes 100 Mb/s

Domaine TéraHertz

$f = 1 \text{ THz} \Rightarrow$  qqes 100 GHz

Domaine optique

$f = 300 \text{ THz} \Rightarrow$  qqes Tb/s

# Avantages et Inconvénients des liaisons optiques sans fil

## Avantages des télécommunications optiques :

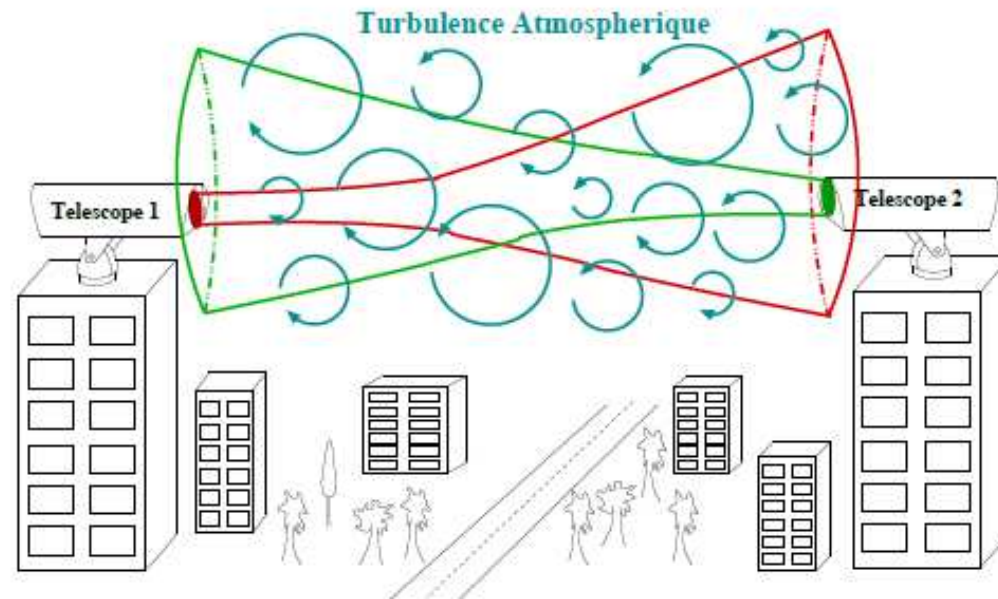
- Fort débit de quelques Gbits à 10 Gbits et donc possibilité de transférer des images à haute définition
- Faisceau directif : canal difficile à détecter et brouiller
- Facilement déployable
- Faible consommation et encombrement faible
- Dispositif léger
- Incidence sanitaire faible (risque maîtrisé)
- Facture environnementale très faible (pas de creusement de sol ou de pose de câbles)
- Pas de license

## Inconvénients :

- Sensible
  - aux obstructions (bâtiments, oiseaux,..)
  - Aux conditions météorologiques à la **diffusion**  $\Rightarrow$  (nuages, brouillard, pluie, neige,...)
  - à la **turbulence atmosphérique**
- Conditions de sécurité oculaire à respecter

# Impact de la turbulence atmosphérique

Diffraction + Turbulence + Diffusion  $\Rightarrow$  divergence du faisceau



Gradients thermiques de l'atmosphère

$\Rightarrow$  fluctuations rapides de l'indice de l'air

$\Rightarrow$  fluctuations de phase et d'intensité du faisceau optique détecté

$\Rightarrow$  Adopter différentes stratégies suivant la portée du système de télécommunication  
(distance émetteur-récepteur)

# Traitement de la turbulence en fonction de la portée

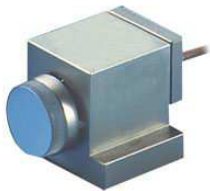
Moyenne portée (>500 m et < 10 km typiquement)

Optimiser la divergence du faisceau

Introduire un système de pointage fin

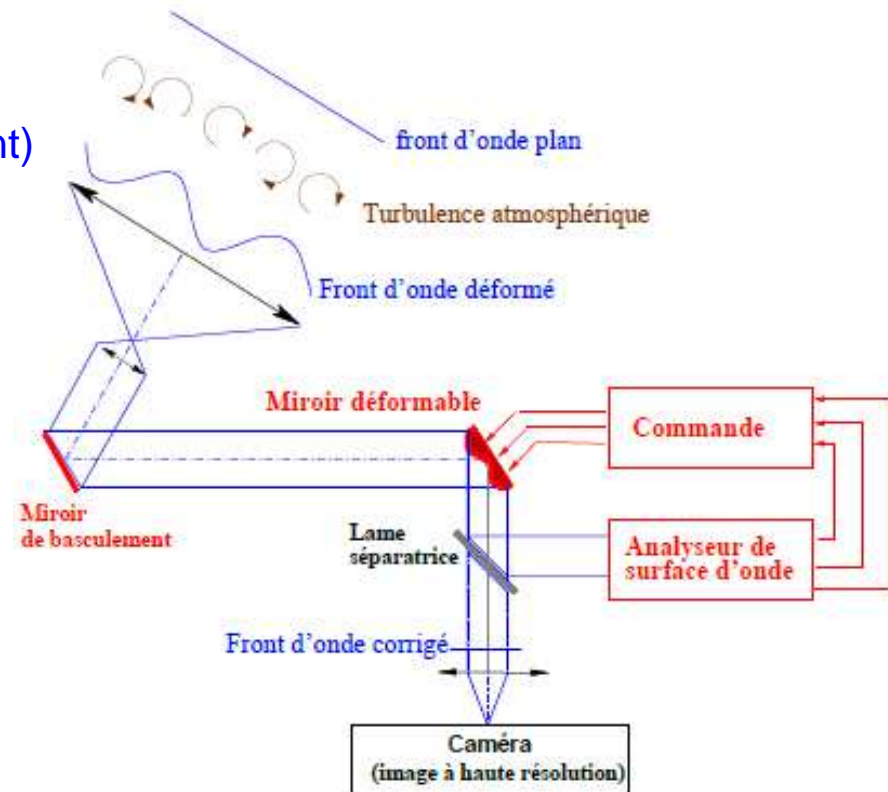
Très longue portée (ex : liaison sol –satellite)

Système optique adaptative



$\phi = 15 \text{ mm}$

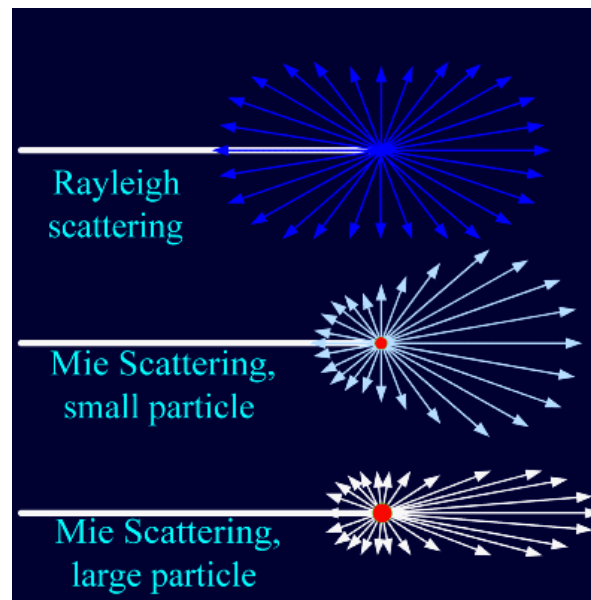
PI





# Impact de la diffusion

Brouillard : fines gouttelettes d'eau en suspension ( $< 100 \mu\text{m}$ )  $\Rightarrow$  Diffusion (Rayleigh, Mie)  
 $\Rightarrow$  Perte de flux et baisse du débit



## Travaux ONERA

Codes ONERA  $\Rightarrow$  Modélisation fine du canal de propagation (turbulence, diffusion) + Mise en œuvre d'une compensation active

Objectifs : Optimiser les performances de télécommunications (débit, BER)

# Essor des télécommunications optiques

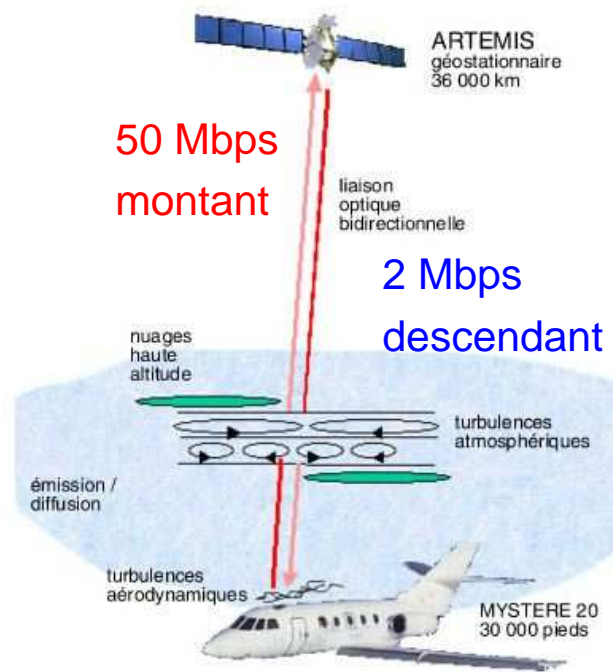


2001 : Premières liaison optique inter-satellite entre le satellite géostationnaire Artémis et SPOT 4 à 50 Mbps -  $\lambda = 800 \text{ nm}$  + système de pointage fin

Objectif : Répondre aux besoins croissant en débit pour internet, la téléphonie mobile, l'observation de la Terre, la météorologie, les vols habités,...

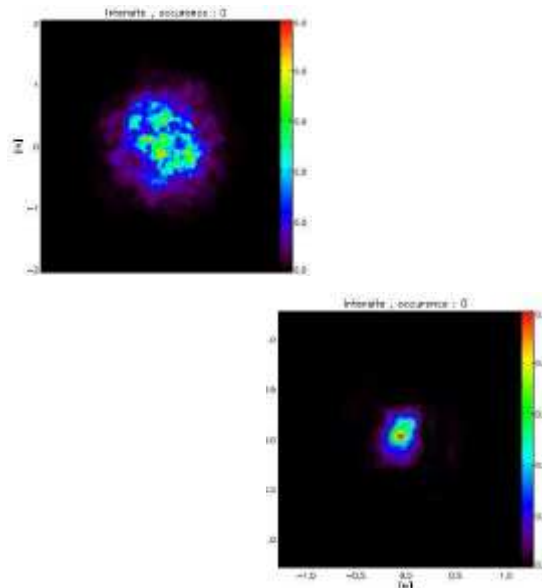
# 2006 : Première liaison optique satellite GEO - Avion

## Projet Lola (Astrium)



- Altitude avion : 9000 m
- Longueur d'onde :  $0.8 \mu\text{m}$

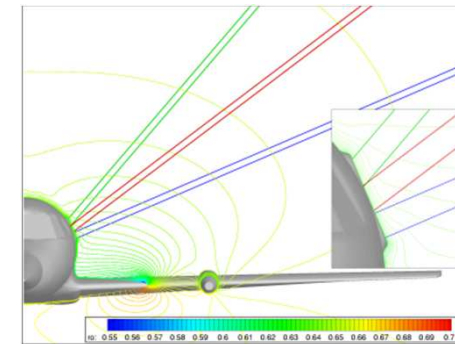
## Turbulence



Faisceaux en sortie de turbulence

Simulation avec code ONERA existant

## Effets aéro-optiques



Lignes d'iso masse – calcul aérodynamique

ONERA : Dimensionnement du terminal optique

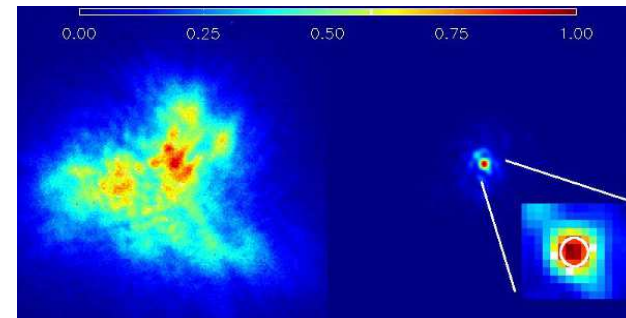
Modélisation des effets de turbulence atmosphérique et des effets aéro-dynamiques

## 2015 - Banc ODISSEE liaison sol-satellite LEO

Le projet DOMINO (Demonstrator for Optical transMission at high data rate iN low earth Orbit) a pour but l'établissement d'un lien optique entre le terminal « Small Optical TrAnponder » (SOTA) implanté sur le satellite LEO japonais SOCRATES et le télescope MEO de l'OCA (diamètre 1,5 m). L'ONERA a en charge la caractérisation des effets de la turbulence atmosphérique sur le lien fourni par le satellite.

Thales Alenia Space (TAS) et Airbus Defense and Space (ADS) sont responsables de la partie communication proprement dite.

Liaisons optiques à  $1,55 \mu\text{m}$  et à  $976 \text{ nm}$  établie avec succès en 2015  
Avec système d'**optique adaptative**



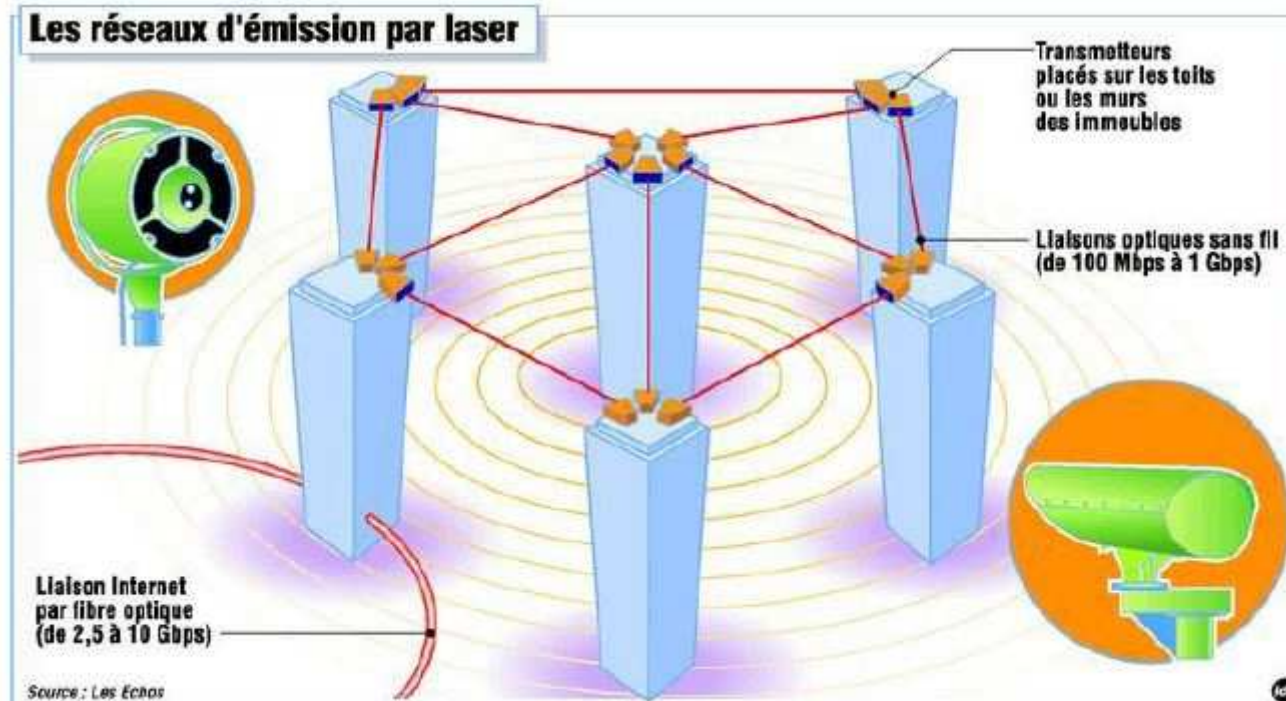
# Historique des démonstrateurs de liaison optique satellite - sol

GOLD	SILEX	LUCE	TERRASAR	ALPHASAT	LLCD	OPALS	SOCRATES	DOMINO
1995	2001	2008	2011	2014	2014	2014	2014	2015
USA/ Japon	Europe	Japon	Europe/ USA	Europe	USA	USA	Japon	France/ Japon (ONERA)
Sol ←GEO	Inter- satellite	Sol←LEO	Sol↔LEO	Sol←GEO	Sol↔ Lune	ISS→Sol	LEO→Sol	LEO→Sol
1 Mbps	50 Mbps	50 Mbps	5,6 Gbps	1,8 Gbps	20 Mbps	50 Mbps	50 Mbps	
$\lambda =$ 830 nm	830 nm	815 nm	1,064 $\mu\text{m}$	1,064 $\mu\text{m}$	1,55 $\mu\text{m}$	1,55 $\mu\text{m}$	1,55 $\mu\text{m}$	1,55 $\mu\text{m}$
						Optique adaptative	Optique adaptative	Optique adaptative

ISS = International Space Station

L'ESA et la NASA déploient de nouveaux projets de télécommunication optique à l'horizon 2018/2020

# Au sol : des liaisons optiques sans fil inter - bâtiments



Terminal optique

Portée garantie  $\approx$  500 m quelque soit conditions météorologiques

Gain en maturité rapide des technologies de télécommunications optiques en espace libre (FSO = Free Space Optics)

$\Rightarrow$  Applications émergentes aux avions

# Etude WIRELESS : Enjeux des liaisons optiques sans fil

Etude ONERA menée en collaboration avec Airbus

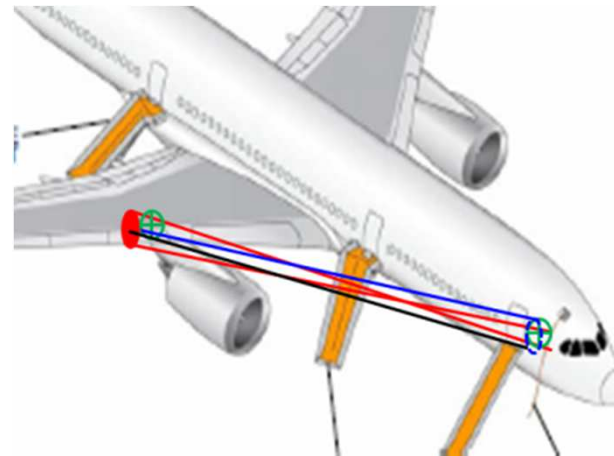
Enjeux : 200 km (A320) à 350 km (A350) de câbles

⇒ réduire le poids des câbles et donc la consommation de kérosène

⇒ Un besoin croissant en débit

Objectifs : Etudier la faisabilité de liaisons optiques sans fil au sein d'architecture de systèmes temps-réel embarqués et **critiques** ⇒ **Liaison baie avionique - aile**

**ONERA** : Approche hybride NIR/THz possible – Modélisation + Réalisation d'un démonstrateur

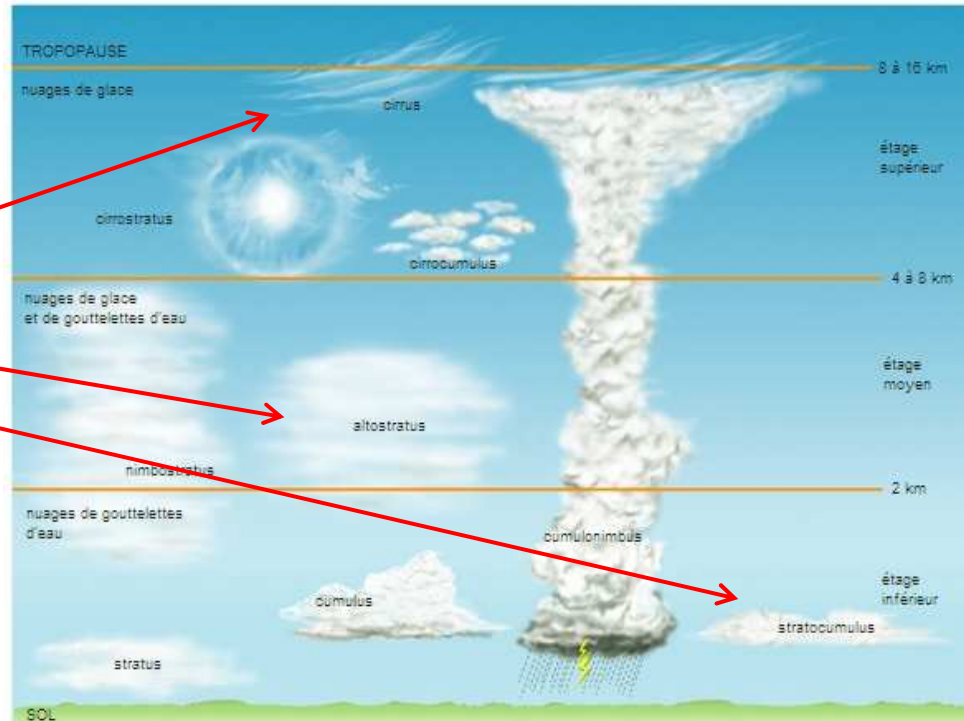


**L = 15 m (A320), 30 m (A350)**

# WIRELESS Evaluation des pertes par diffusion

## 5 cas considérés

1. Temps clair
2. Cirrus (10 km)
3. Altostratus (4,5 km)
4. Stratocumulus (1,5 km)
5. Brouillard épais (50 m)



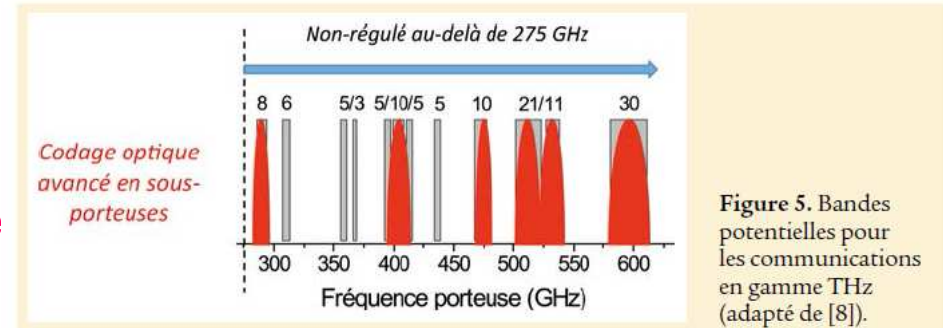
Calcul de la transmission du faisceau à l'aide de Matisse (logiciel [ONERA](#))  
Nuages les plus épais altostratus

Résultats préliminaires à  $1,5 \mu\text{m}$  :  $\text{BER} \leq 10^{-4}$  et  $C > 200 \text{ Mb/s}$  = objectifs atteints  
Prochaine étape : prendre en compte les effets aéro-optiques



# WIRELESS : Travaux envisagés dans le domaine TéraHertz à l'ONERA

Les ondes TéraHertz sont arrêtées par le métal et fortement absorbées par les molécules d'eau  
⇒ Applications à faibles portées en espace libre



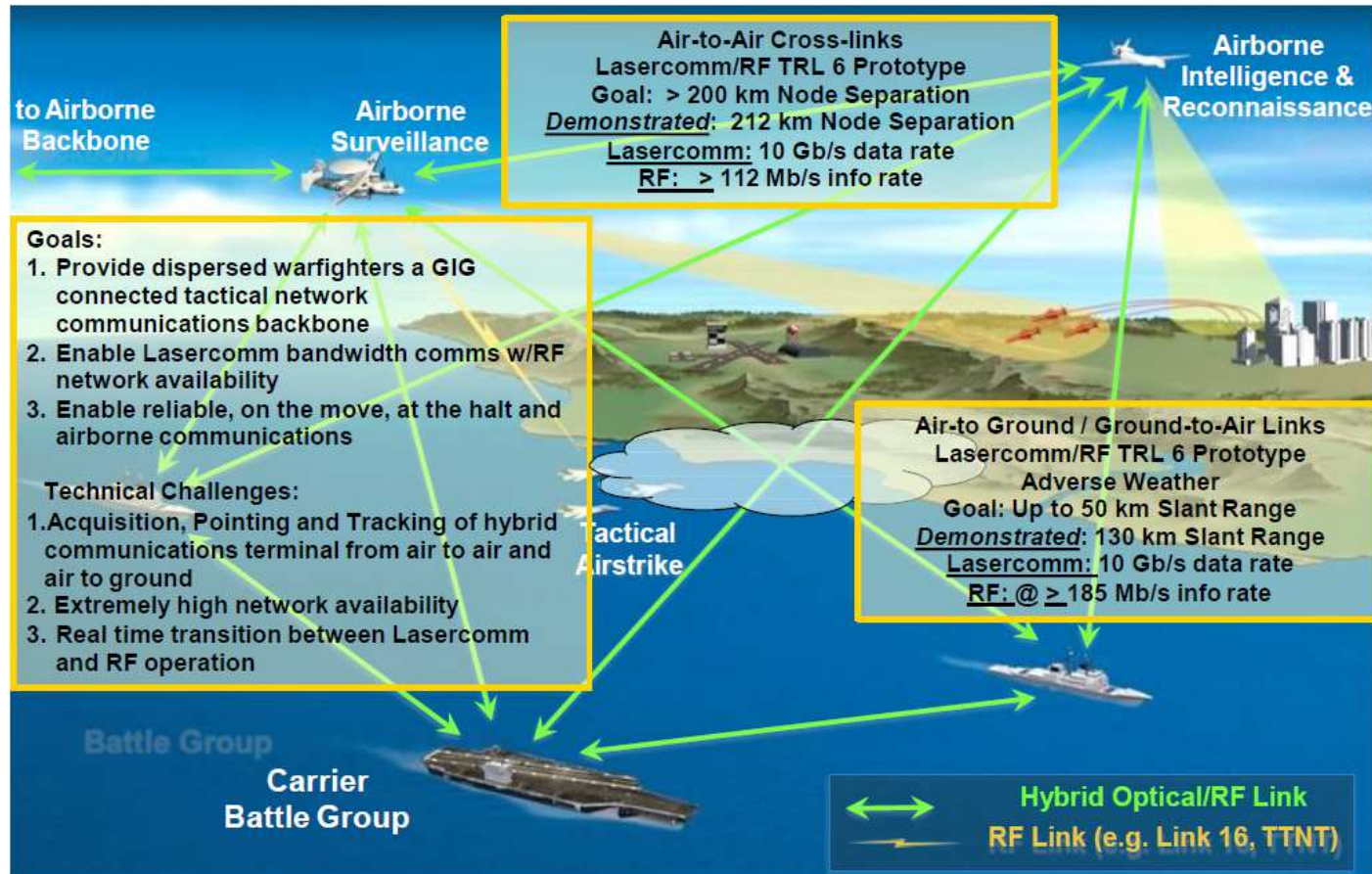
Différents démonstrateurs :

- 50 Gbps à 0,3 THz au Nippon Telegraph and Telephone (NTT)
- 46 Gbps à 0,4 THz à l'Université de Lille (IEMN)

**Travaux ONERA** = modéliser fine du canal de propagation :

- la géométrie du système
- les conditions atmosphériques (brouillard, pluie, nuages,...)
- l'atténuation

# Projet FOENEX (2009) : liaisons sol-avion et inter-avions

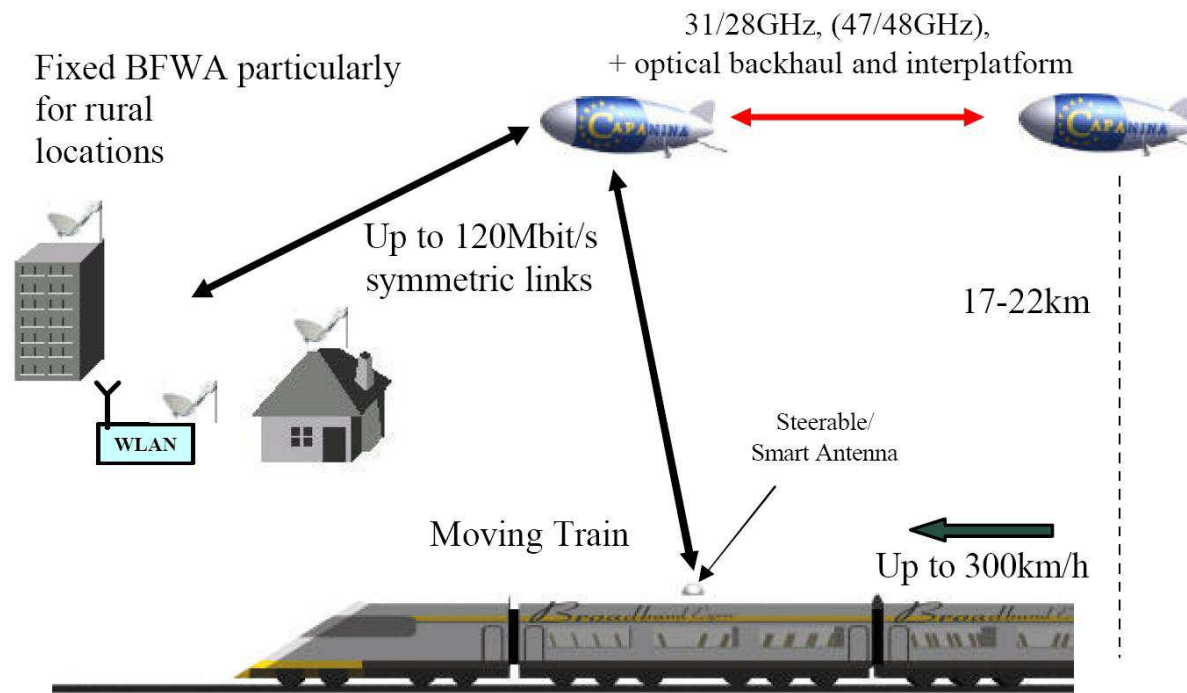


Projet DARPA (United States Defense Advanced Research Projects Agency)

**Démonstration d'une liaison optique inter-avions (2012) : 10,3 Gbps à L=200 km**

# Etude européenne CAPANINA (2006)

Réseau de ballons pour un accès permanent à une station sol quelque soit la couverture nuageuse



Concept diagram for project

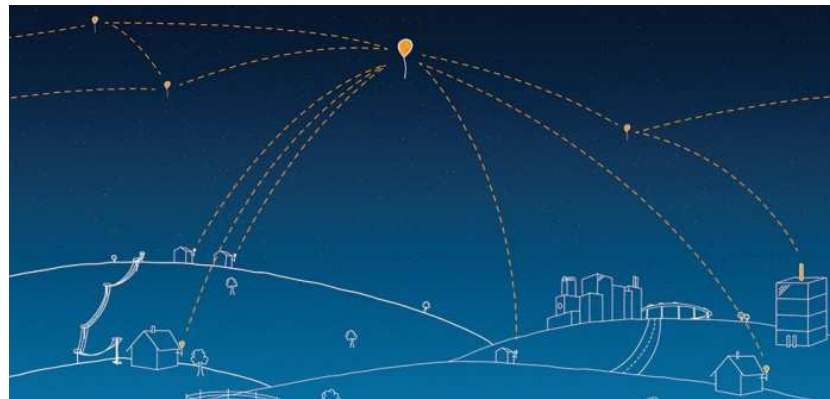
ESA : Vol d'essai d'une semaine et mise en œuvre d'une liaison radio ballon-sol

## Projets Ballon : High Altitude Platforms (HAPs)

Lancement du projet **Stratobus** (2016, ThalesAléxia)  
Drone déployable pendant un an et repositionnable  
Altitude 20 km, 115 m de long, 250 kg de charge utile  
Alimentation par énergie solaire, vol stationnaire  
Mission de surveillance (terrestre, maritime,...)  
**Fourniture de la 4G et de la 5G dans le futur**  
Premier prototype en 2018



Projet Google **Loon** : ballons stratosphériques dérivants  
Objectif : apporter internet aux régions isolées  
Charge utile : 20 kg



# FSO : liaisons optiques sol-drone

Intérêt :

- Difficulté de déployer des fibres optiques dans certaines zones
  - Transfert d'images à très haute définition
  - Dispositif FSO léger
- Poids drones → 2 kg + Charge utile limitée

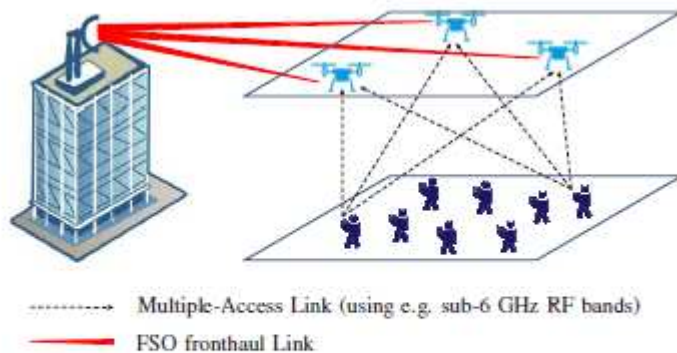


Fig. 1. Proposed drone-based communication system where the drones communicate with the mobile users via an RF multiple-access link and with the central unit via FSO fronthaul links.

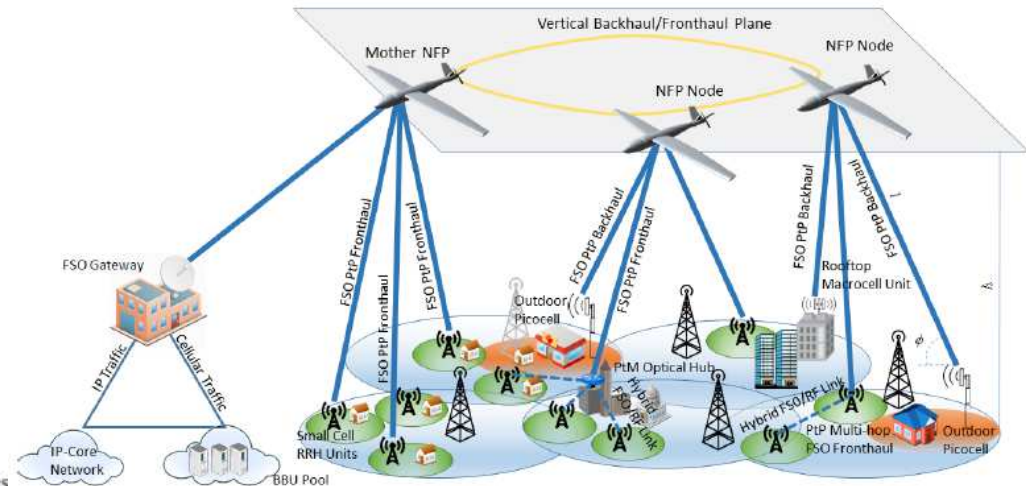


Fig. 1: Graphical illustration of vertical fronthaul/backhaul framework for 5G+ wireless networks.

Najafi, oct. 2017

Alzenad, mai 2017

# Liaisons sol-drone : autres missions envisageables

FSO facilement déployable

Acquisition d'images à très haute définition ou de données volumineuses

Suivi évènementiel : Ex Jeux Olympiques

Mission d'inspection :

- Inspection des bâtiments, voies ferrées
- Surveillance du Volcan (ex : l'Etna)

Situations de sinistre (ex à Saint-Martin après le cyclone Irma

- ⇒ Déploiements de drones d'inspection des routes et villes,
- ⇒ Mise en place de télécommunications locales

Peu de situations de brouillard au niveau de la mer en zone tropicale

Insertion progressive et réglementée des drones dans l'espace aérien

Technologies IR matures pour développer des systèmes de télécommunications sol-drone ou inter-drone/ballons

Un réseau de HAPs (ballon) à haute altitude permet de s'affranchir des contraintes dues à la couverture nuageuse : liaison sol-ballon

Liaison sol-drone : Grand nombre d'applications potentielles

Rapide évolution des composants dans le domaine des TéraHertz avec un fort potentiel en débit sur de courtes portées.

**ONERA :**

Modéliser finement la turbulence, les effets de diffusion **pour chaque application**

Dimensionner un système de télécommunications optiques (optique, TéraHertz)

Améliorer les performances en fonction des conditions météorologiques