

TÉLÉCOMMUNICATIONS SPATIALES ET ESPACE LOINTAIN

CARACTÉRISTIQUES, PERFORMANCES, PERSPECTIVES

Lionel TAILHARDAT
ELE124 – MINIEXP 2015

Vue d'ensemble

2

- Description du sujet
 - Contexte, Attendus & Enjeux
- Caractéristiques
 - Affaiblissement, Modélisation, Standardisation
- Performances
 - Etat de l'art, Radioscience
- Perspectives
 - Axes d'amélioration & Domaines de recherche
- Conclusion

Description du sujet

Contexte

3

Des missions à caractère scientifique : Exploration planétaire & Radioscience.

Un environnement technico-économique en progression permanente :

- Agences spatiales (ESA, NASA, JAXA),
- Organismes de standardisation (UIT, CCSDS, UAI),
- De l'analogique aux FPGA : des bps aux Mbps en 20 ans.

Des objectifs sur la fiabilité des transmissions et l'efficience des systèmes.

Des besoins tirés par les débits et la portée :

- Les attendus en Télécommande = 500 bps min., en Télémétrie = 1 Mbps min.,
- Ceinture de Kuiper : ~45 UA (affaiblissement e.l. = ~ -287 dB @ bande X).

Un milieu physique complexe :

- Système perpétuellement en mouvement,
- Délai de propagation : ~5h Terre → Pluton,
- Diffraction et déconvergence atmosphérique, latence induite par le plasma interstellaire et l'activité solaire,
- Bruit thermique, rayons cosmiques,
- Effets relativistes, déflection et lentilles gravitationnelles.

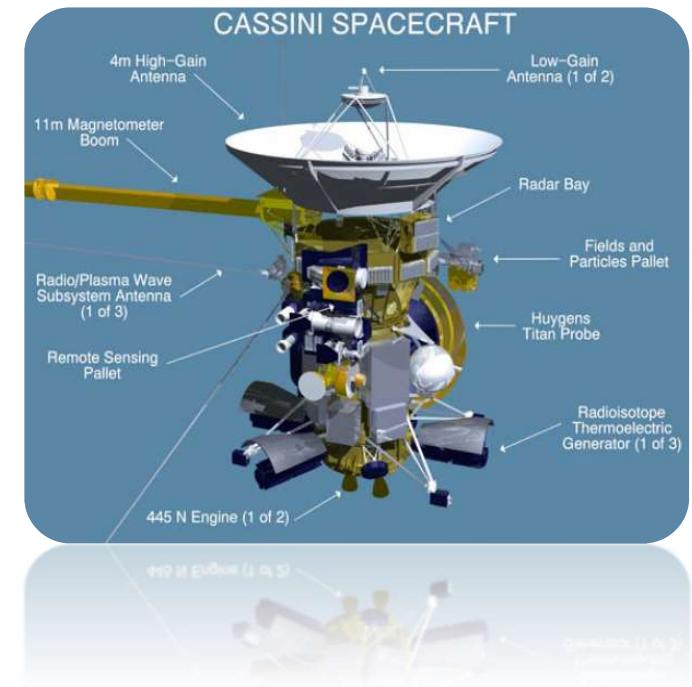
Face à la complexité, quelles grandes questions pour rationaliser ?

Description du sujet

Enjeux & objectifs principaux (télécom.)

4

- **Augmenter la largeur de bande** pour des débits plus élevés (données scientifiques HD; liaison A/V pour des missions habitées),
- **Améliorer l'efficacité** des systèmes pour des communications sur de plus longues distances,
- **Améliorer l'efficience** des systèmes pour des missions de plus longue durée,
- **Standardiser** pour l'interopérabilité et la réduction des coûts.



... SNR, bande, énergie, normes. Comment modéliser ?

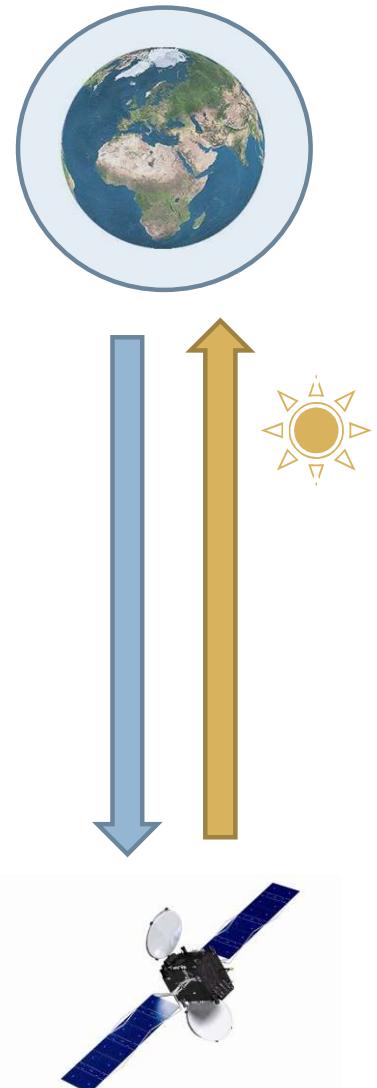
Facteurs de performance

Modèle de Friis

5

$$P_R = P_T L_T G_T L_{TP} L_S L_A L_P L_{RP} G_R L_R$$

Variable	Description	Sous-variables principales
P_R	Puissance reçue à l'entrée du récepteur ou du préamplificateur	Rendement
P_T	Puissance en sortie d'antenne à l'émission	Impédance
L_T	Perte de câblage à l'émission	Impédance caractéristique Longueur
G_T	Gain de l'antenne d'émission	λ , Ouverture d'antenne Facteur d'efficacité d'antenne
L_{TP}	Perte à l'émission due au pointage	Alignement Az-El réciproque
L_S	Perte sur le segment spatial	Longueur d'onde Distance
L_A	Atténuation atmosphérique	Coefficient d'absorption
L_P	Perte de polarisation	Alignement des plans E Réflexions
L_{RP}	Perte de pointage à la réception	Alignement Az-El réciproque
G_R	Gain d'antenne à la réception	λ , Ouverture d'antenne Facteur d'efficacité d'antenne
L_R	Perte de câblage à la réception	Impédance



... des variables identifiées, mais dont il faut gérer tous les cas de figure.

Modélisation des missions

Du ‘worst case’ au ‘Design Control Table’

6

- Worst Case :
 - Déterminisme intéressant
 - Pas de gestion de projet optimale

- Design Control Table :

$$y = y_1 y_2 \dots y_k \quad \xrightarrow{\hspace{10em}} \quad x_i = 10 \log_{10} y_i , \quad i = 1, 2, \dots, K \quad \xrightarrow{\hspace{10em}} \quad x = x_1 + x_2 \dots x_K$$

- Démarche exploratoire / effets de la météo (prépondérant en bandes X et supérieures)
- Technique du percentile météo (première approximation)
 1. Condition en temps sec et ciel clair
 2. x-percentile du temps la dégradation due à la météo est moins défavorable que prévue
 3. (100 – x) du temps la dégradation est pire
- Calcul des marges, moyennes et niveau de confiance (unités en dB)
 - Design value
 - Tolérance optimiste
 - Tolérance pessimiste
- Exigence : $\overline{SNR} \geq (SNR_{attendu} + n\sigma)$

... une méthodologie de conception avec un focus sur le SNR, issue d'une forte collaboration.

Performance(s)

De la nécessité des normes

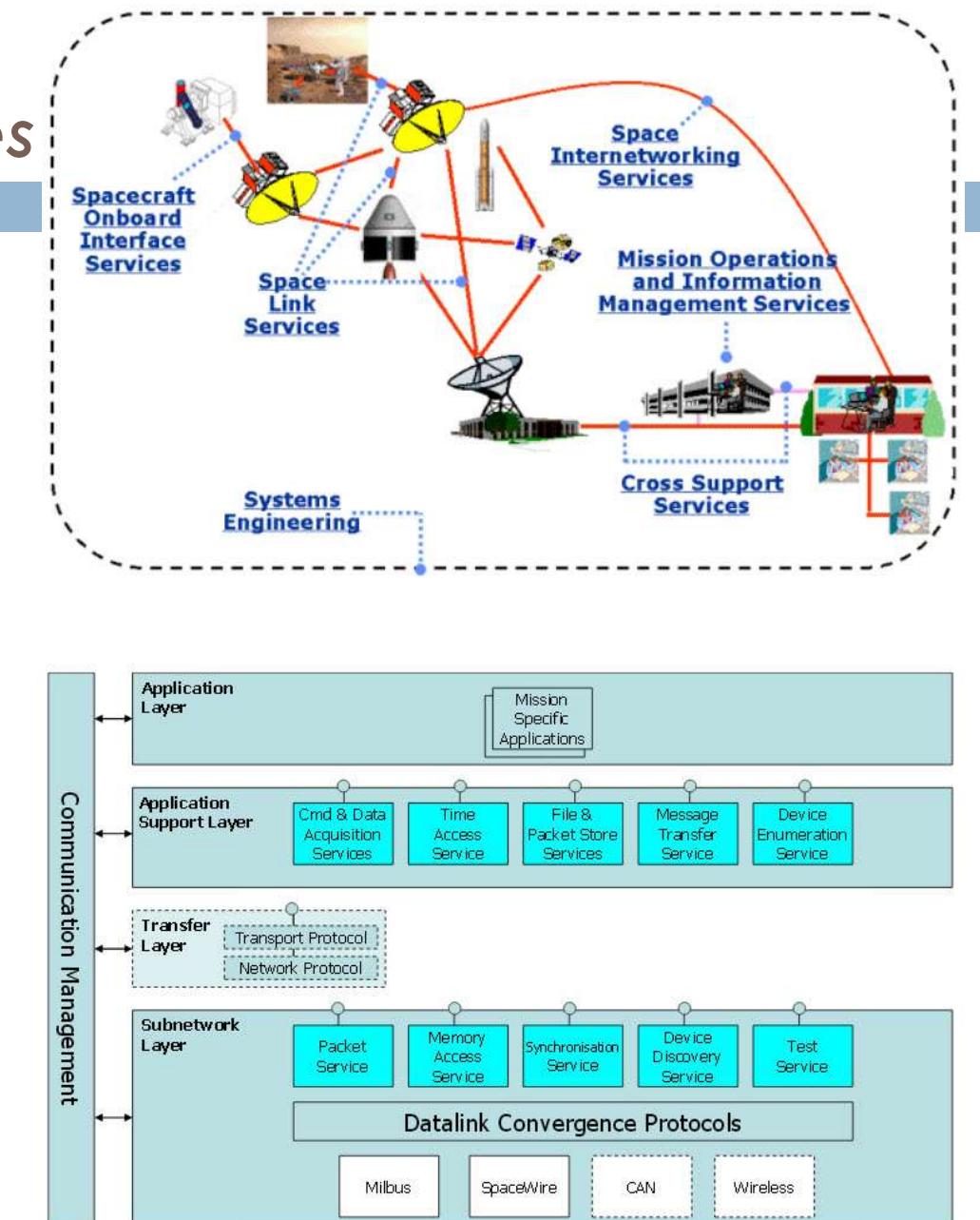
7

□ Effets

- Performances (p.e. mise en commun d'antennes d'agences différentes),
- Dynamisme de la recherche,
- Tendance à la hausse du volume des Données scientifiques : Centres de calcul Traitement de données massives,
- Coûts de développement & Coûts de structure,
- Sécurité des systèmes : piratage et sabotage (hypothèse de dev. commercial ou de propriété des données).

□ Hypothèses clés

- Mise en réseau des stations,
- Architecture standardisée de plateforme,
- Protocoles paquet avec encapsulation,
- Compatibilité DVB-ETSI.



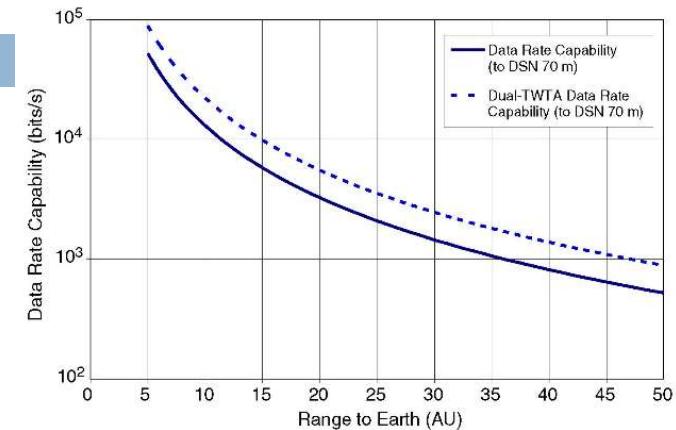
... de l'interopérabilité et de la performance. Où en est-on concrètement ?

Performances

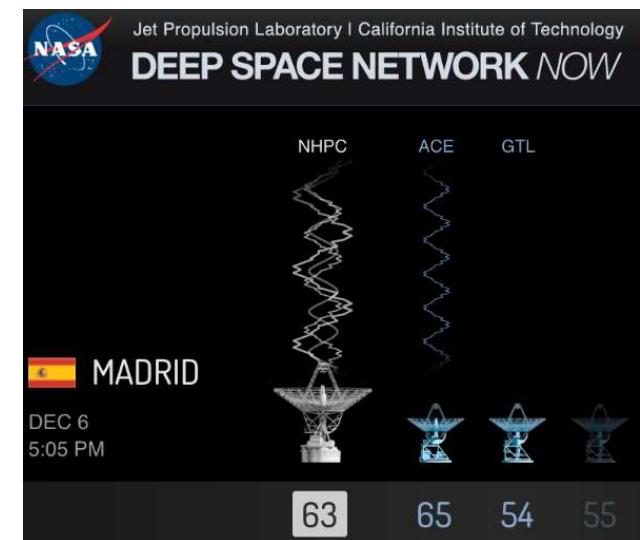
A quoi s'attendre aujourd'hui ?

8

Caractéristique	New Horizons (2006) NASA – Pluton	Cassini (1997) NASA – Saturne
Canal & Modulation	- BPSK Polar. : LHC + RHC	NRZ-L Bi-phase-L BPSK -
Télémétrie	Turbo code , norme CCSDS $R = 1/6$	Reed Solomon (255,223) 2 maximum-likelihood convolutional Viterbi decoders (7,1/2) & (15, 1/6)
\varnothing antenne sonde	2,1 m	4 m Cassegrain, 2 réflect.
\varnothing antenne Terre	63 m	34 m
RTT Light Time	9,69 h @ 5,23.10⁹ km	2,78 h @ 1,5.10⁹ km est.
Data rate (U/L)	n.a. kbps 7,18 GHz P_T : 114 dBm est. P_R : -107 dBm est.	0,5 kbps [8; 12] GHz est. P_T : 111 dBm est. P_R : -118 dBm est.
Data rate (D/L)	2,810 kbps 8,44 GHz P_T : 2 x 40 dBm est. P_R : -141,46 dBm	0,014 kbps [8; 12] GHz est. P_T : 88 dBm est. P_R : -153,65 dBm est.



Spec. NHPC / DSN 70 m.

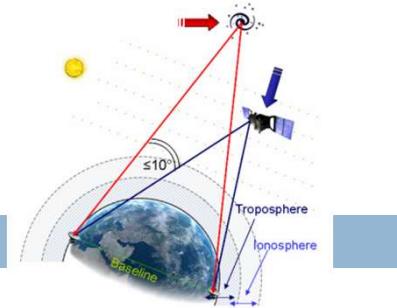


... des résultats tangibles et des performances en progression, pour la science.

Radioscience

Quels gains pour la science ?

9

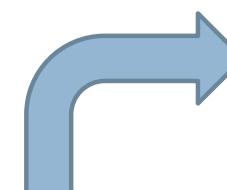


Densité électronique (ionosphère, couronne solaire, espace interplanétaire)

- Vitesse de propagation (2 fréquences) sachant la distance du vaisseau : densité électronique sur la ligne de mire,
- Fréquence Doppler (2 fréquences) en phase d'occultation : densité électronique de l'atmosphère.



Informations déduites de divergences en
Amplitude,
Fréquence,
Phase,
Temps de propagation de groupe,
Polarisation.



Relativité générale

- Déflexion de l'onde : Champ de gravité, Observation d'objets distants,
- Décalage vers le rouge des oscillateurs : Champ de gravité,
- Variation de l'impulsion sur la fréquence Doppler aller-retour : Ondes gravitationnelles

Pression, température et composition de l'atmosphère de corps célestes

- Variation de fréquence en phase d'occultation : angle de réfraction de l'atmosphère,
- Index de réfraction en fonction de la hauteur : température et pression relative,
- Intensité : présence de vapeurs ou de condensats.



Masse et champs de gravité des corps célestes

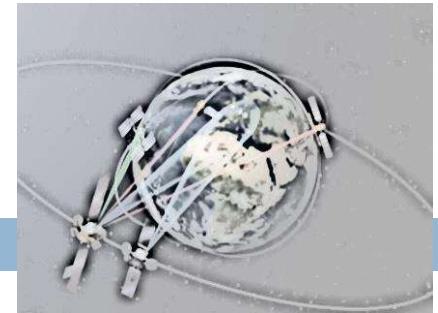
- Doppler, ranging, VLBI : changement d'attitude du vaisseau / masse du corps,
- De la Masse du corps : Composition chimique à priori / classe de planète

... sciences et transmissions, 2 domaines intriqués. Comment aller plus loin ?

Perspectives

Axes d'amélioration et domaines de recherche

10



Electronique et technologies de l'information :

- **Liaisons** : de la RF au laser pour une plus grande largeur de bande (attention au pointage)
- **Bruit** : Supraconductivité, Stations spatiales de relais, Transformée de Karhunen-Loeve,
- **Sensibilité** : Antennes en réseau, Stabilité des O.L.,
- **Codage** de canal : du BCH au LDPC,
- **Synchronisation** : algorithmes de filtrage adaptatif pour maintenir la synchro en cas de C/N faible,
- **Protocoles** d'échange : Store & Forward multipoints, Licklider Transmission Protocol (hop-by-hop), SCPS-TP (end-to-end), Bundle-Protocol.

Technologies informatiques :

- **Intelligence Artificielle** : autogestion de l'engin en situation d'urgence ou de liaison faible avec le centre de contrôle, améliore l'efficience énergétique,
- **Model-Checking** et Techniques de **programmation** : amélioration de la sûreté de fonctionnement,
- Logiciels de **prédiction** : anticipation des risques et des opérations nécessaires.

Procédures

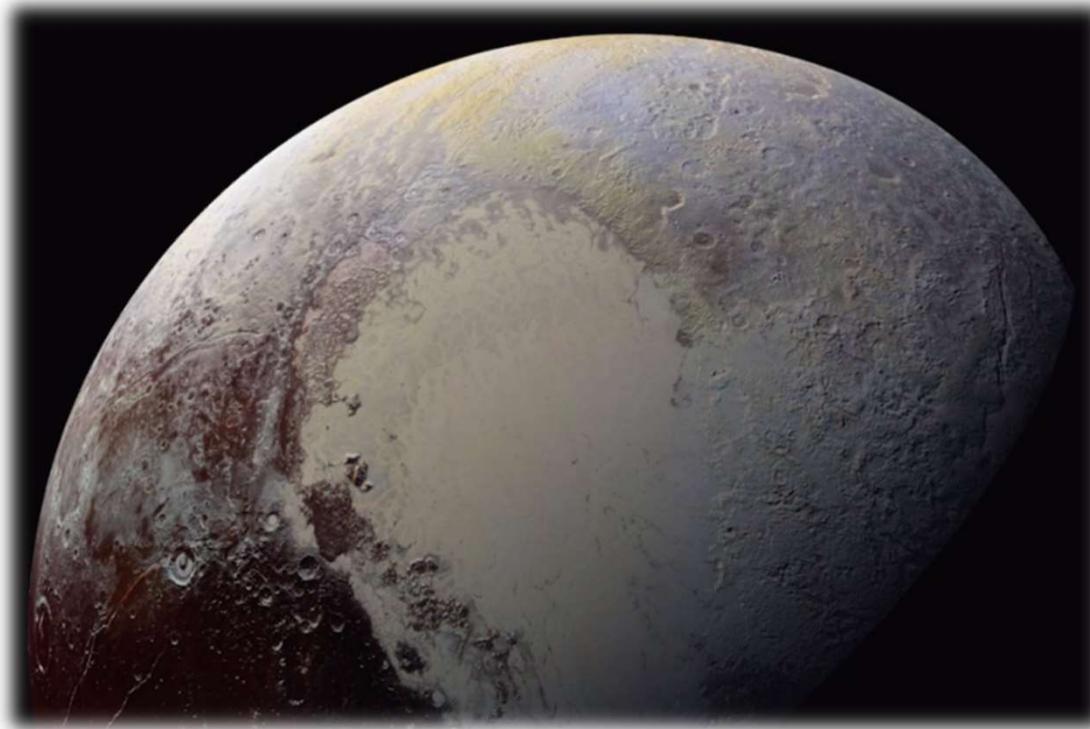
- Allocation des **bandes** : bien répartir les missions pour ne pas partager les même ressources radio,
- Réallocation des **ressources des plateformes** : éteindre un élément pour allouer temporairement plus d'énergie à une transmission.

... une recherche dynamique tendant à l'automatisation et l'extension des missions.

Conclusion

11

- Des sources d'erreur multiples impactent négativement la capacité du canal
- Des variations de performance apportent une connaissance du milieu
- Des solutions opérationnelles s'ajoutent aux solutions technologiques



Pluton,

Observation du 14 Juillet 2015 par la sonde New Horizons.

Résolution : [75; 85] m / pixel

Poids : ~2 Mbit compr. / image

Délai trans. : ~42'

... merci.