

TÉLÉCOMMUNICATIONS SPATIALES ET ESPACE LOINTAIN

CARACTÉRISTIQUES, PERFORMANCES, PERSPECTIVES

Vue d'ensemble

2

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

Description du sujet

Contexte

3

Des missions à **caractère scientifique** : Exploration planétaire & Radiosciences.

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'efficacité 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 : ~ 5 h Terre \rightarrow Pluton,
- ▣ Diffraction et déconvergence atmosphérique, latence induite par le plasma interstellaire et l'activité solaire,
- ▣ Bruit thermique, rayons cosmiques,
- ▣ Effets relativistes, déflexion et lentilles gravitationnelles.

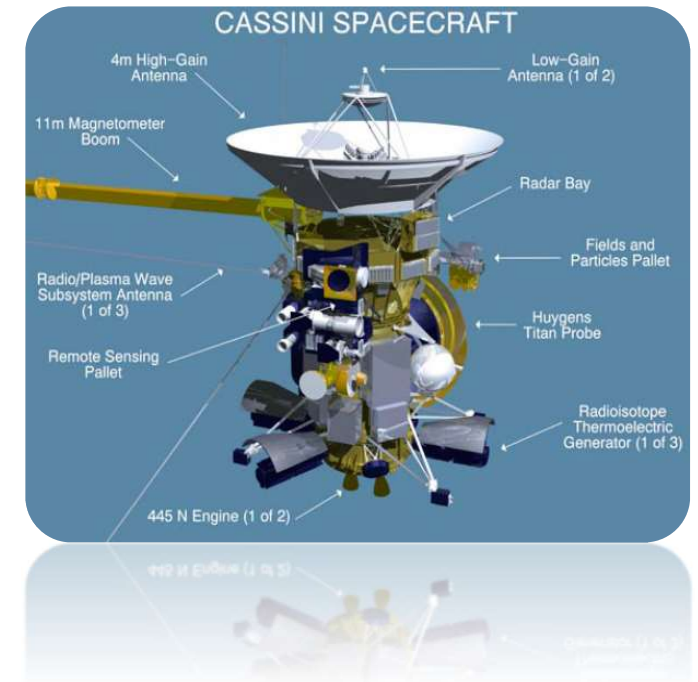
Face à la complexité, quelles grandes questions pour rationaliser ?

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 ?

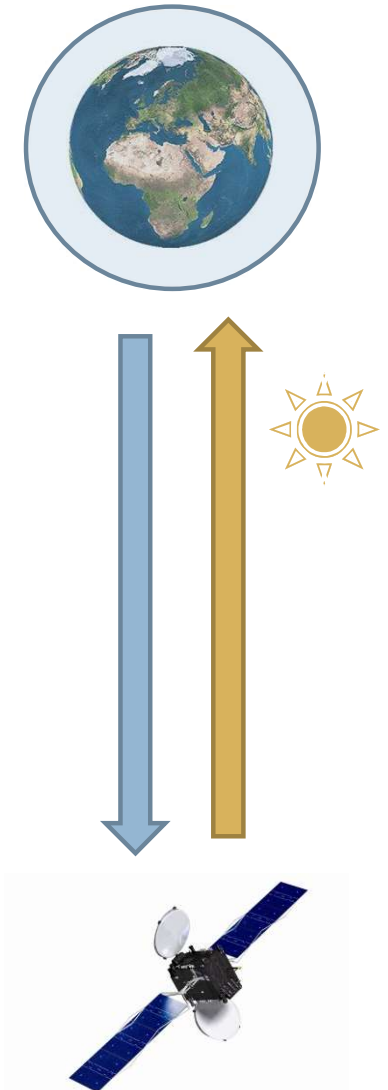
Facteurs de performance

Modèle de Friis

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

5

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.

Performance(s)

De la nécessité des normes

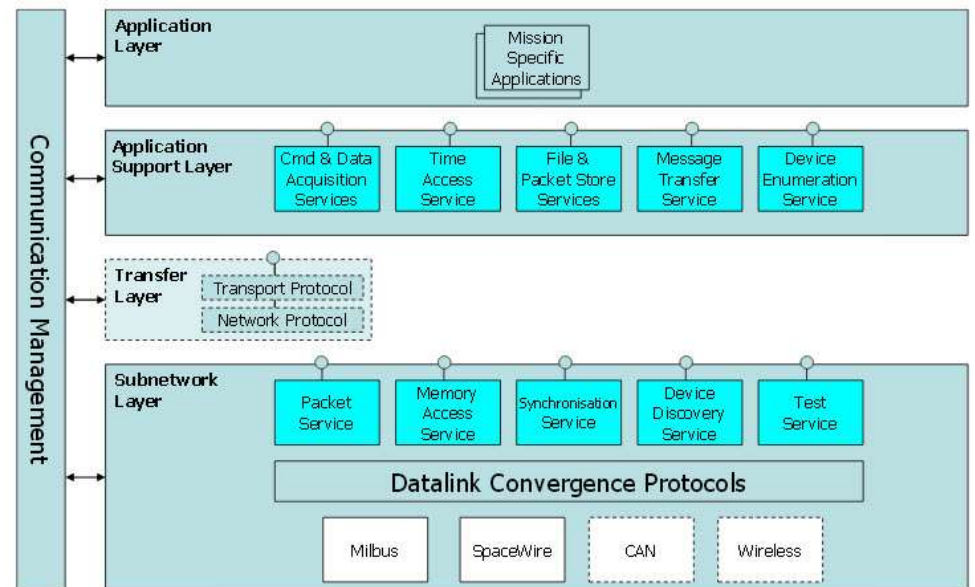
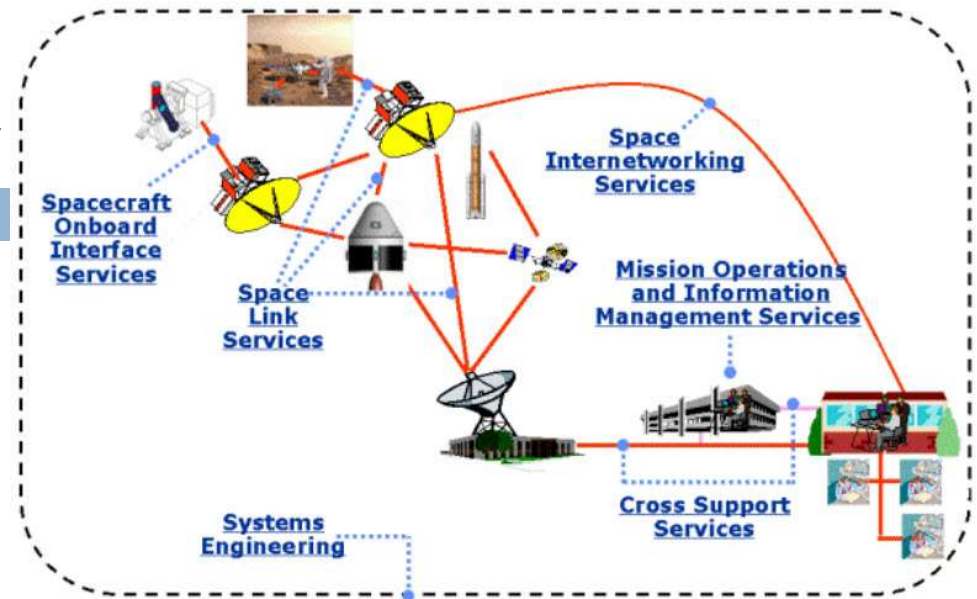
7

□ 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.



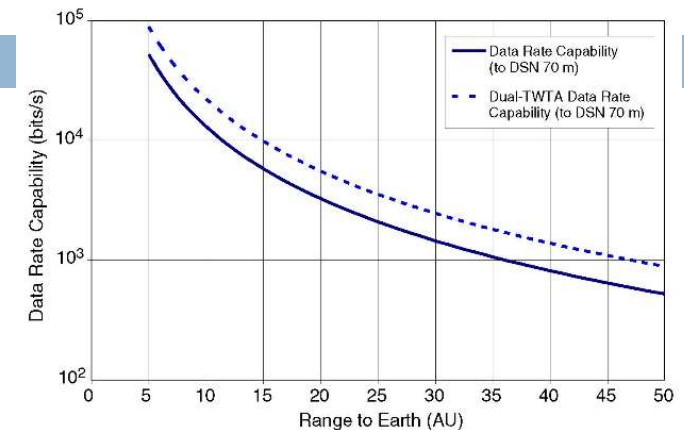
... de l'interopérabilité et de la performance. Où en est-on concrètement ?

Performances

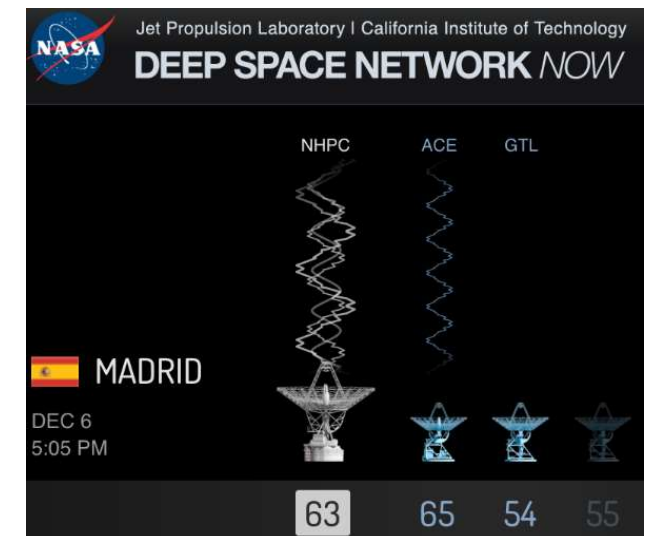
A quoi s'attendre aujourd'hui ?

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)
Ø antenne sonde Ø antenne Terre	2,1 m 63 m	4 m Cassegrain, 2 réflect. 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.

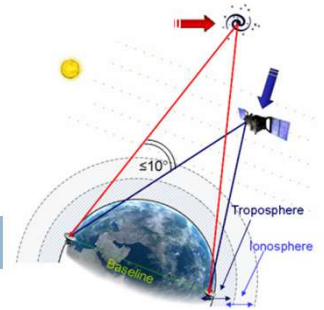


... des résultats tangibles et des performances en progression, pour la science.

Radiosciences

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*.

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*.

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*

Masse et champs de gravité des corps célestes

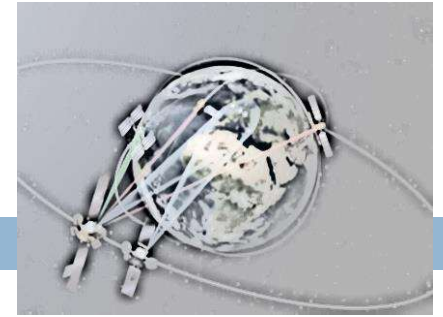
- Doppler, ranging, VLBI : *changement d'attitude du vaisseau / masse du corps*,
- De la Masse du corps : *Composition chimique à priori / classe de planète*

... 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'efficacité énergétique,
- ❑ **Model-Checking** et Techniques de **programmation** : amélioration de la sûreté de fonctionnement,
- ❑ Logiciels de **prédiction** : anticipation des risques et des opérations nécessaires.

Procédures

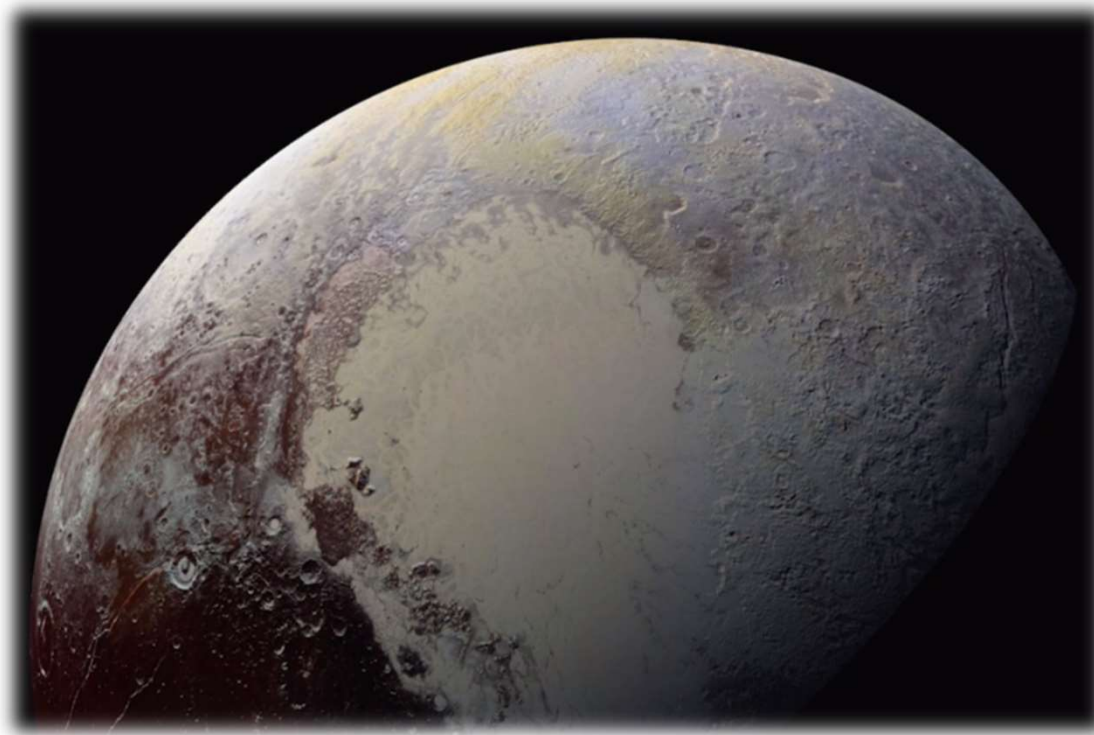
- ❑ Allocation des **bandes** : bien répartir les missions pour ne pas partager les mêmes ressources radio,
- ❑ Réallocation des **ressources des plateformes** : éteindre un élément pour allouer temporairement plus d'énergie à une transmission.

... 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.