

Performances des Protocoles de Transport dans les Constellations de Satellites

Amal BOUBAKER, *IRIT/TéSA*

4 Mai 2022



Table des matières

① Contexte

Constellations de satellites

Protocoles de transport

② Environnement système

Constellation de satellites, TCP et outils retenus

③ Impact de la var. de délai

Simulation de l'impact de la variation de délai sur Cubic

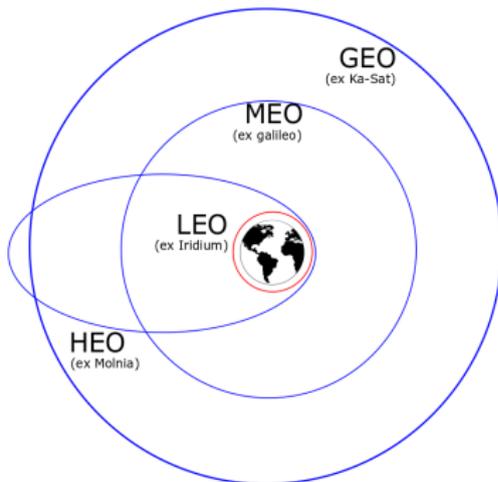
Émulation de l'impact de la variation de délai sur Cubic et BBRv1

④ Équité pour Cubic et BBRv2

⑤ Conclusions

Constellations de satellites

- **1990s** : Apparition des premières constellations de satellites non-géosynchrones à orbite basse (LEO)
⇒ Fiasco des **1990s** des constellations de satellites
- **2010s** : Course à l'espace (*Space Race*) encore une fois de mise
⇒ Retour des constellations de satellites, ces dernières années



Constellation de satellites type

La constellation de satellites *Iridium NEXT* va servir de modèle :

- Orbite LEO, circulaire et quasi-polaire (constellation- π)
- 6 plans orbitaux et 11 satellites par plan
- 4 ISLs
- Pas de *cross-seam* ISLs
- et elle est complètement déployée

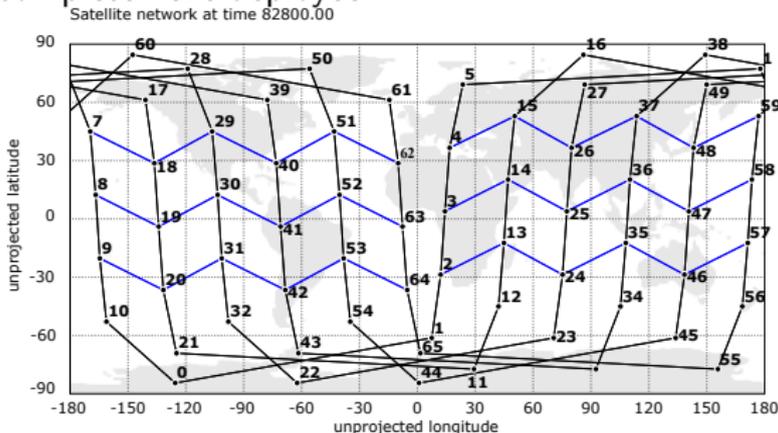


Figure 1: Tracé de la topologie d'*Iridium NEXT* [9]

Constellation de satellites type : sources de variation de délai

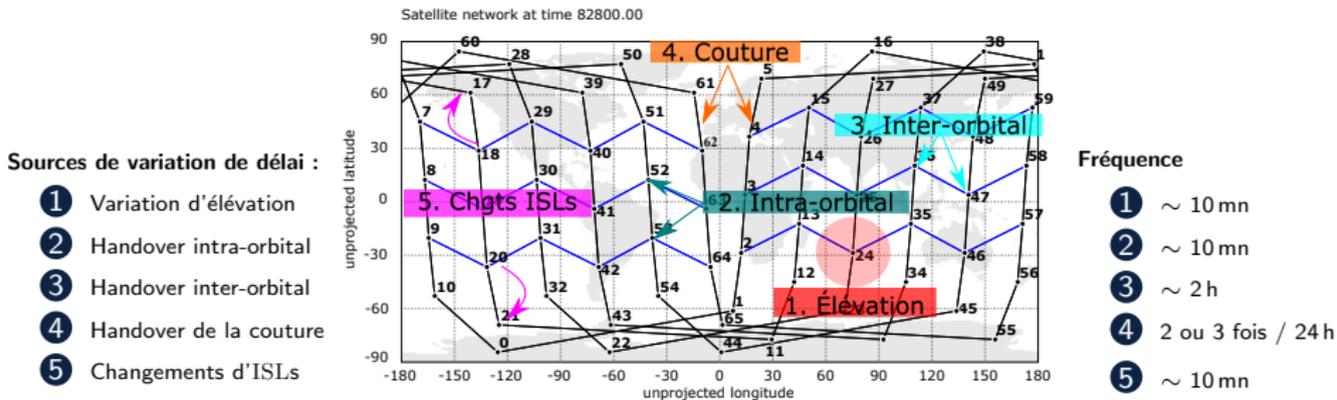


Figure 2: Les différentes transitions de variation de délai [8]

Constellation de satellites type : sources de variation de délai

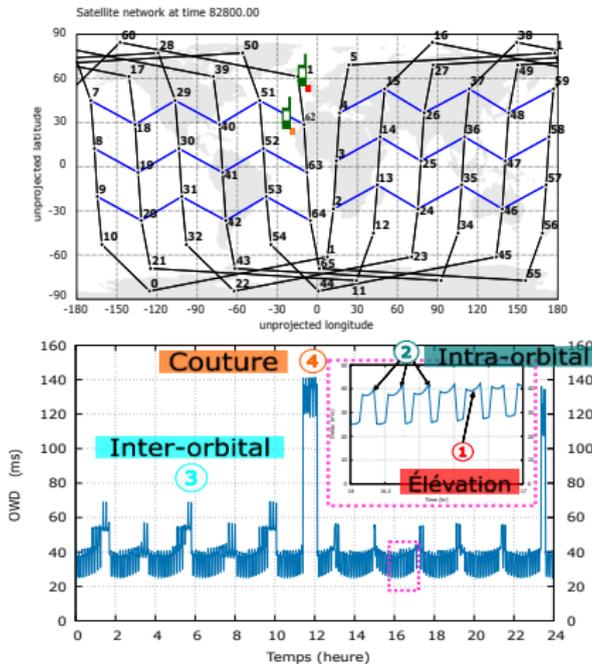


Figure 3: One-way Delay (OWD) avec les sources de variation de délai

⇒ Facteurs de variation fréquents mais de faible amplitude, et vice-versa

Table des matières

① Contexte

Constellations de satellites

Protocoles de transport

② Environnement système

Constellation de satellites, TCP et outils retenus

③ Impact de la var. de délai

Simulation de l'impact de la variation de délai sur Cubic

Émulation de l'impact de la variation de délai sur Cubic et BBRv1

④ Équité pour Cubic et BBRv2

⑤ Conclusions

Transmission Control Protocol (TCP)

- Protocole mode connecté de bout-en-bout, 1980s, réseaux terrestres très largement amélioré, depuis
- **Objectif** : max débit + min délai = Point de fonctionnement idéal **de Kleinrock** [10]
- **Fonctionnement** : Modèle de boîte noire
- **Problème** : Congestion

TCP : types

Selon le type de l'algorithme de Congestion Avoidance (CA) :

loss-based	Terrestre	<i>New Reno, CUBIC</i>
	Satellite	<i>TCP Noordwijk, TCP Hybla</i>
delay-based	Terrestre	<i>TCP Vegas</i>
capacity-based	Terrestre	<i>TCP Westwood</i>
	Satellite	<i>TCP Peach</i>
hybride	Terrestre	<i>Compound TCP, TCP BBR</i>
learning-based	Terrestre	<i>TCP Remy</i>

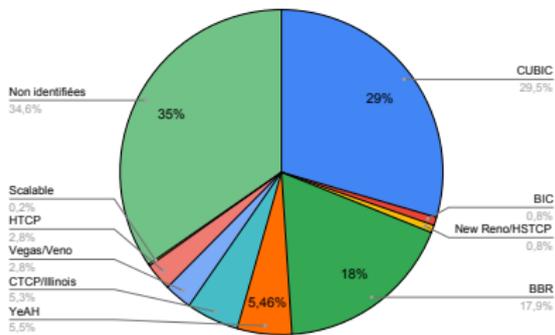


Table 1: Variantes de TCP

⇒ Adaptation de TCP au contexte satellite

Figure 4: Répartition des variantes de TCP [11]

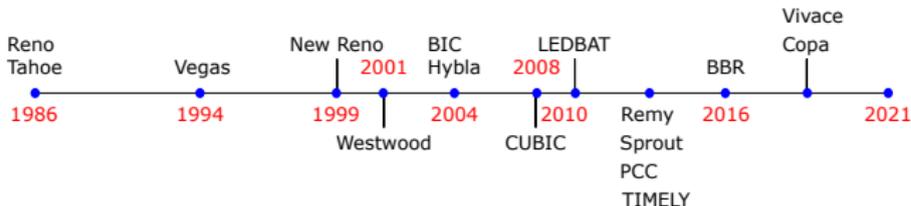


Figure 5: Évolution des algorithmes de contrôle de congestion de TCP [11]

TCP CUBIC

→ TCP par défaut dans le noyau Linux

→ RFC 8312 [14]

→ *loss-based* ⇒ *loss-based* classiques extrêmement inefficaces dans les LFNs (BDP plus de 100 kbit)

→ TCP CUBIC développé pour résoudre les problèmes des mécanismes précédents avec les LFNs. ⇒ AIMD + fonction cubique

→ $CWND(t) = C(t - K)^3 + W_{max}$

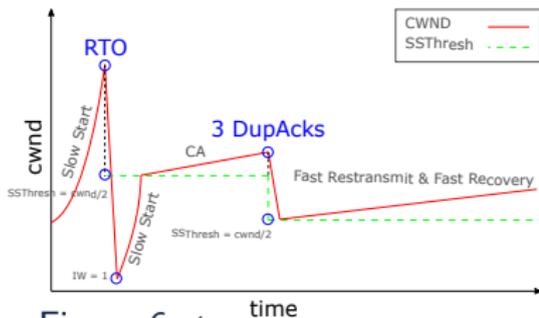
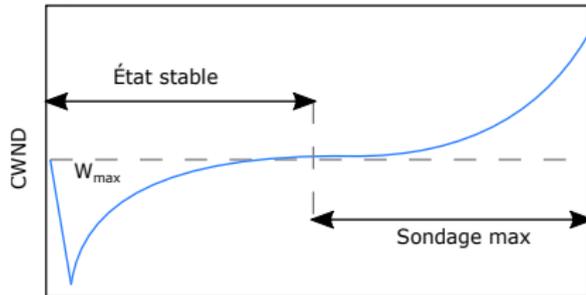


Figure 6: Évolution de la CWND de New Reno



Temps écoulé depuis la dernière perte de paquets

Figure 7: Évolution de la CWND de CUBIC [13]

TCP Bottleneck Bandwidth and Round-trip propagation time (BBR)

- Conçu/développé par Google, appliqué aux apps Google (YouTube, Google Cloud Platform)
- Deux versions : v1 en 2016 et v2 en 2019, draft d'un RFC de BBRv2 [3]
- Hybride
- Maintenir un équilibre entre débit et délai ⇒ Point optimal de fonctionnement
- Machine à états

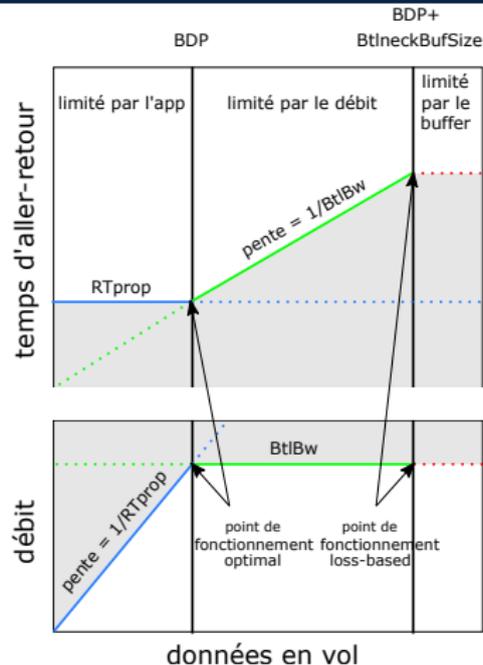


Figure 8: Principe de base de fonctionnement de BBR [5]

Table des matières

① Contexte

Constellations de satellites

Protocoles de transport

② Environnement système

Constellation de satellites, TCP et outils retenus

③ Impact de la var. de délai

Simulation de l'impact de la variation de délai sur Cubic

Émulation de l'impact de la variation de délai sur Cubic et BBRv1

④ Équité pour Cubic et BBRv2

⑤ Conclusions

Caractéristiques Iridium NEXT

- Orbite LEO (altitude 780 km), circulaire et quasi-polaire (constellation- π)
- 6 plans orbitaux et 11 satellites par plan
- 4 ISLs
- Pas de *cross-seam* ISLs

Algorithmes TCP :

- TCP CUBIC : *loss-based*
- TCP BBR : hybride

Outils :

- Simulation : NS-2
- Émulation : OPENSAND

Sources de variation de délai dues à :

- ① Élévation
- ② Handover intra-orbital
- ③ Handover inter-orbital
- ④ Couture

Table des matières

① Contexte

Constellations de satellites

Protocoles de transport

② Environnement système

Constellation de satellites, TCP et outils retenus

③ Impact de la var. de délai

Simulation de l'impact de la variation de délai sur Cubic

Émulation de l'impact de la variation de délai sur Cubic et BBRv1

④ Équité pour Cubic et BBRv2

⑤ Conclusions

Paramètres

- Capacité de la file : BDP
- Débits Up/Down-links :
 - Bas débit : 1.5 Mbit/s
 - Haut débit : 120 Mbit/s
- Débits ISLs :
 - Bas débit : 25 Mbit/s
 - Haut débit : 2 Gbit/s
- Topologie en Dumbbell :
Source GW - *Iridium NEXT* -
Hawaï
- Outil : NS-2
- TCP CUBIC
- Nombre de flux : 1
- CBR
- Taille de fichiers :
 - 9 kB
 - 15 MB
 - illimitée (*unlimited-bulk*)

Impact de la couture : fichier 9 kB

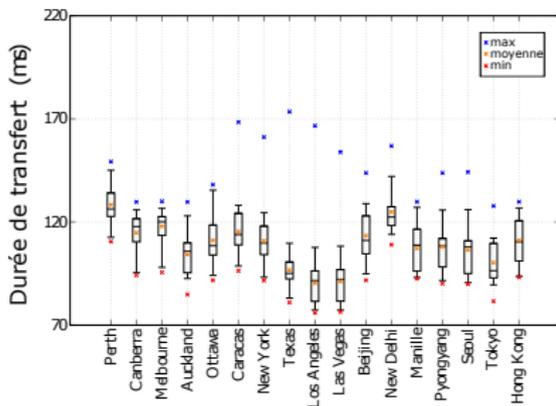


Figure 9: Durée de transfert, fichier 9 kB en dehors de la couture, bas débit

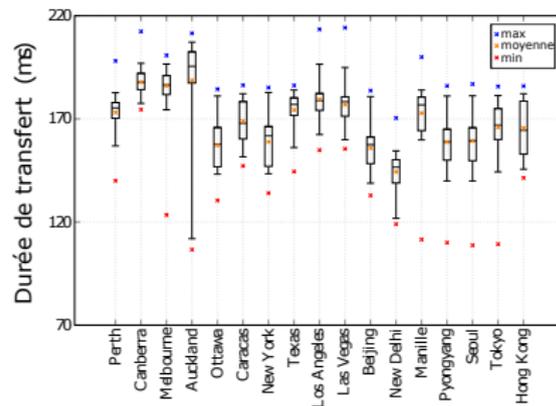


Figure 10: Durée de transfert, fichier 9 kB séparés par la couture, bas débit

→ New Delhi : 124 ms en dehors de la couture, 144 ms séparés par la couture = une augmentation de 15,6 %.

→ Los Angeles : 90 ms en dehors de la couture, 179 ms séparés par la couture = une augmentation de 98 %.

Impact de la couture : fichier 9 kB

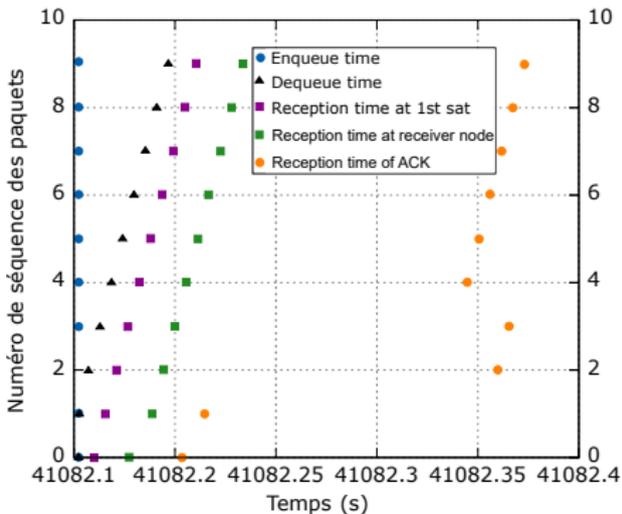


Figure 11: Fichier de 9 kB, passage par la couture

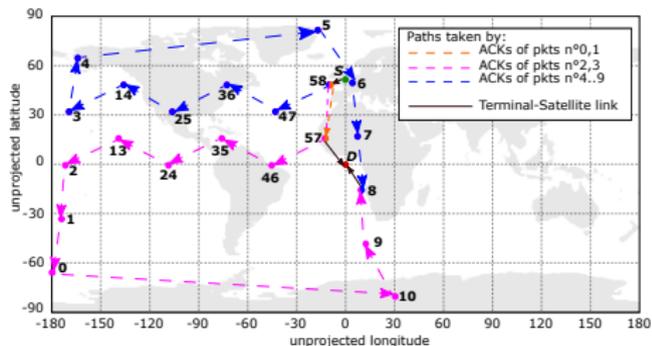


Figure 12: Chemins empruntés par tous les paquets ACK, fichier 9 kB passage par la couture

Impact de la couture : fichier 15 MB

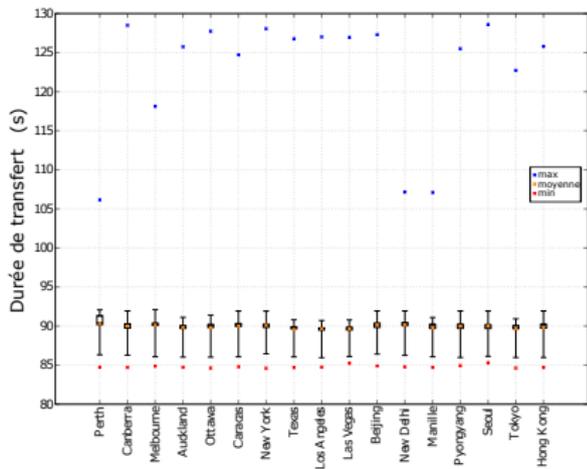


Figure 13: Durée de transfert, fichier 15 MB en dehors de la couture, bas débit

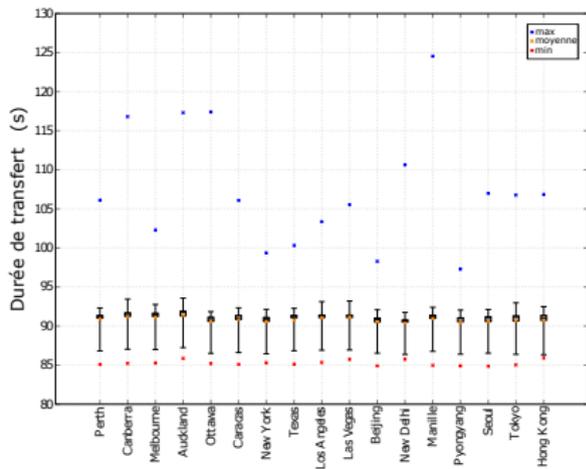


Figure 14: Durée de transfert, fichier 15 MB séparés par la couture, bas débit

→ Pas de différence flagrante.

→ Mesure impact délai dû au *handover* de la couture, en fonction de la taille du fichier.

Impact de la couture

Taille du fichier Paramètre	fichier de 9 kB	fichier de 15 MB
Mean Transfer Time (MTT) _{no seam}	90.35 ms	89.67 s
MTT _{seam}	179.43 ms	91.02 s
MTT _{no seam} / MTT _{seam} (%)	50.35	98.52

Table 2: MTT des fichiers, GW à Hawaï et terminal à Los Angeles

Tailles du fichier (kB)	25	50	100	500	1000	5000	10000
Paramètre							
mean(MTT _{no seam} / MTT _{seam})(%)	59.38	59.35	69.79	90.71	96.78	99.97	98.55

Table 3: Impact de la couture en fonction de la taille des fichiers

→ > 100 kB, beaucoup moins d'effet.

→ En haut débit, mêmes tendances.

Impact de la variation de délai due aux autres différentes sources

- Variation d'élévation :

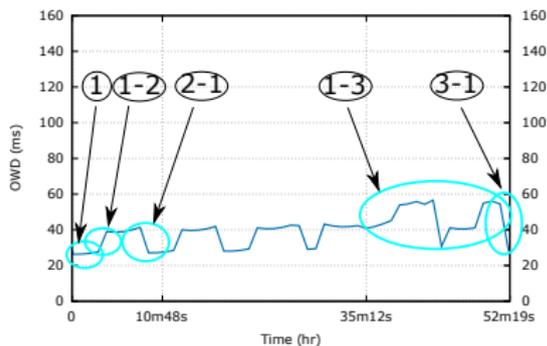


Figure 15: Zoom sur les transitions de l'OWD

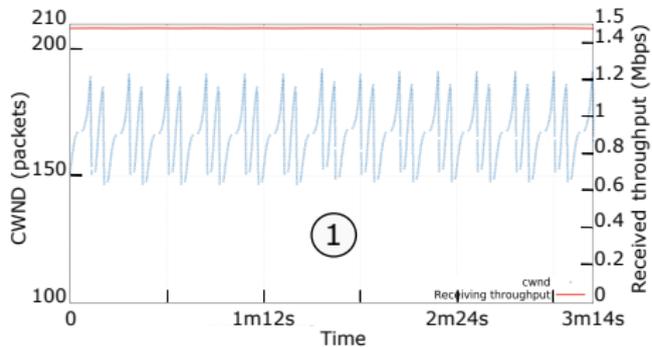


Figure 16: Délai dû à la variation d'élévation, bas débit

Délai varie doucement dans [2.6 ms ; 8.2 ms] pour le même et seul lien satellite.

→ La variation d'élévation n'affecte pas les mesures de performance de TCP.

Impact de la variation de délai due aux autres différentes sources

- *Handover* intra-orbital :

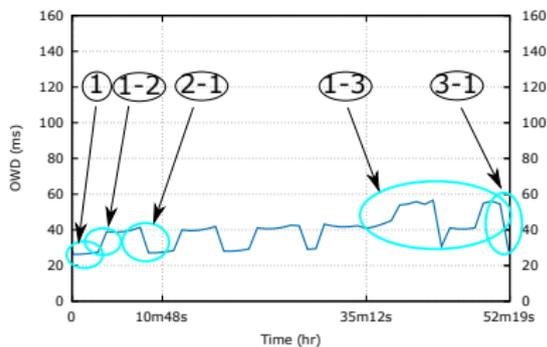


Figure 17: Zoom sur les transitions de l'OWD

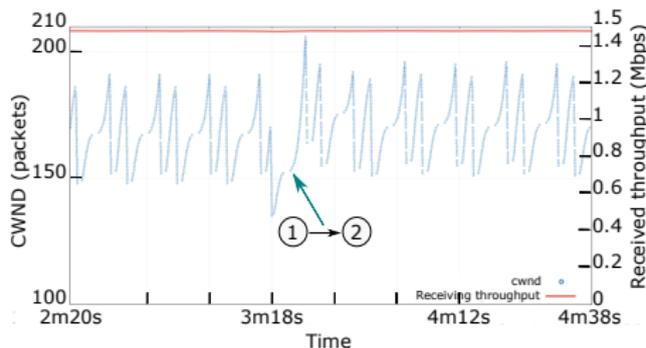


Figure 18: Délai dû au *handover* de l'élévation à l'intra-orbital, bas débit

Pas beaucoup d'impact sur débit, même si impact sur CWND.

→ Avant la transition, l'OWD varie peu autour de 26 ms.

→ À la transition, l'OWD passe de 26 ms à 41 ms, donc augmentation du BDP.

Impact de la variation de délai due aux autres différentes sources

● Handover intra-orbital :

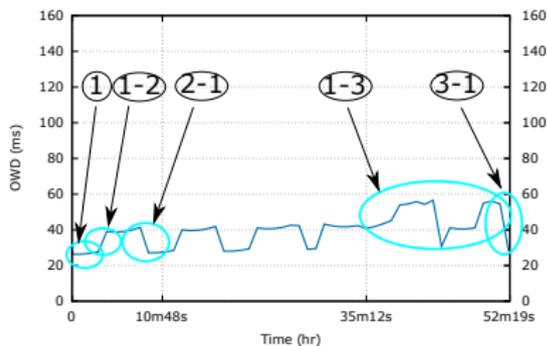


Figure 19: Zoom sur les transitions de l'OWD

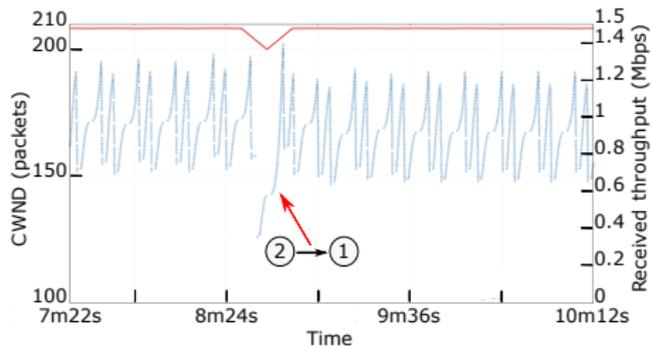


Figure 20: Délai dû au handover de l'intra-orbital à l'élévation, bas débit

Impact sur débit et CWND.

→ Transition quasi-inverse (à 1-2), l'OWD passe de 41 ms à 28 ms.

→ Chute brusque OWD, donc BDP, détectée par les pertes sur CWND via des RTT plus courts.

Impact de la variation de délai due aux autres différentes sources

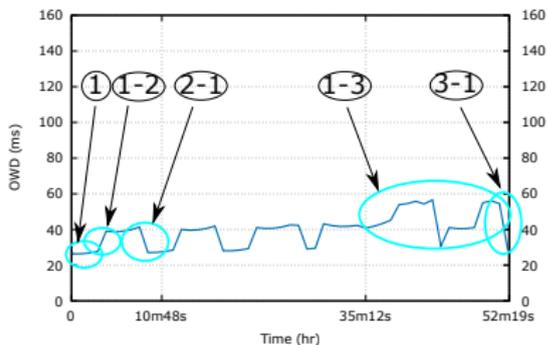
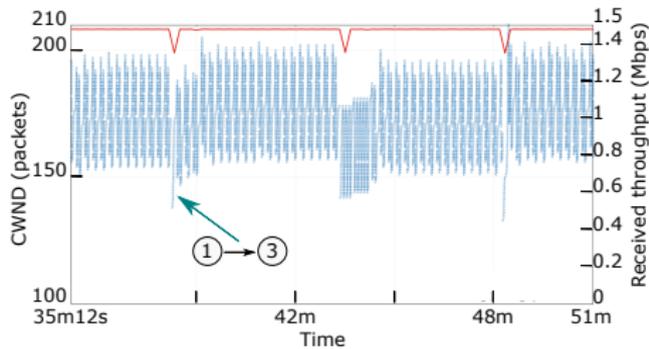
● *Handover* inter-orbital :

Figure 21: Zoom sur les transitions de l'OWD

Figure 22: Délai dû au *handover* de l'élévation à l'inter-orbital, bas débit

- Augmentation de délai ⇒ même explication que 1-2.
- *Handover* à un sat d'un autre plan orbital, donc plus de pertes que l'*handover* intra-orbital (1-2).
- 2ème chute, même explication que précédemment 2-1, l'OWD diminue de 56 ms à 30.6 ms.
- 3ème chute, l'OWD de 30.6 ms à 41.17 ms, BDP plus important, des pertes supplémentaires.

Impact de la variation de délai due aux autres différentes sources

- *Handover* inter-orbital :

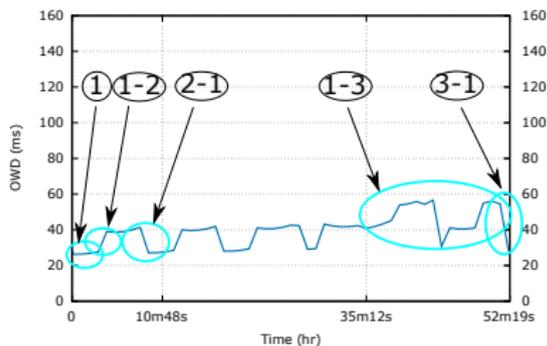


Figure 23: Zoom sur les transitions de l'OWD

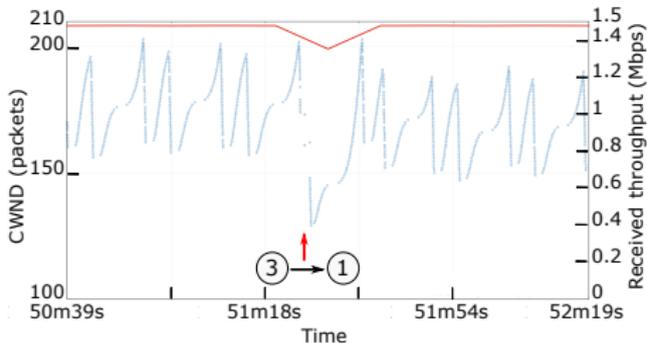


Figure 24: Délai dû au *handover* de l'inter-orbital à l'élévation, bas débit

- L'OWD diminue de 56 ms à 29 ms, même explication que pour transition 2-1.
- Impact similaire à celui de l'intra-orbital (2-1).

Impact de la variation de délai due aux différentes sources

Dans le cas étudié :

- ⇒ **Handover en élévation** : 10 mn, pas d'impact.
- ⇒ **Handover intra-orbital** : 10 mn, diminution plus ou moins significative en bas et haut débit.
- ⇒ **Handover inter-orbital** : toutes les 2 h, diminution plus ou moins significative en bas et haut débit.
- ⇒ **Handover dû à la couture** : 2 ou 3 fois sur 24 h. Augmentation significative pour les fichiers taille < 100 kB, impact marginal pour les grandes tailles de fichiers.

Table des matières

- 1 Contexte
 - Constellations de satellites
 - Protocoles de transport
- 2 Environnement système
 - Constellation de satellites, TCP et outils retenus
- 3 Impact de la var. de délai
 - Simulation de l'impact de la variation de délai sur Cubic
 - Émulation de l'impact de la variation de délai sur Cubic et BBRv1
- 4 Équité pour Cubic et BBRv2
- 5 Conclusions

Paramètres

- Capacité de la file : BDP
- Débits Up/Down-links :
 - Bas débit : 1.5 Mbit/s
 - Haut débit : 49.5 Mbit/s
- Débits ISLs :
 - Bas débit : 25 Mbit/s
 - Haut débit : 825 Mbit/s
- Topologie en Dumbbell :
Source - Destination : Londres - Atlantique
- Outil : OPENSAND
- TCP CUBIC / TCP BBRv1
- Nombre de flux : 1
- CBR
- Taille de fichiers :
 - illimitée (*unlimited-bulk*)

Impact de la variation de délai

- CUBIC et BBRv1, bas débit, OPENSAND :

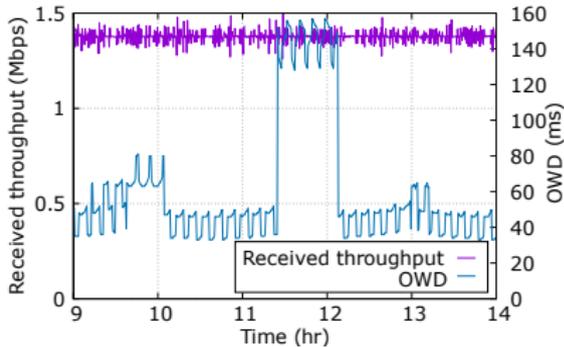


Figure 25: Débit reçu, CUBIC sous OPENSAND, bas débit

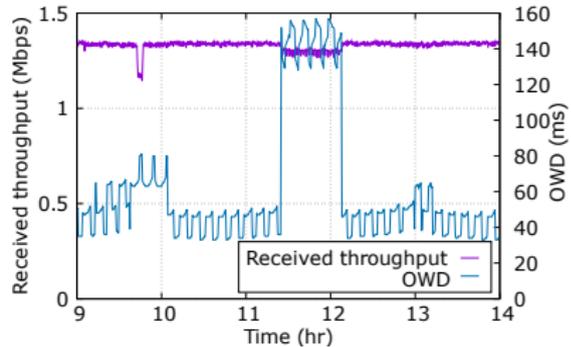


Figure 26: Débit reçu, BBRv1 sous OPENSAND, bas débit

→ BBRv1 plus stable que CUBIC, mais variation du débit.
 ↪ Stabilité : *Probe BW*.

Impact de la variation de délai

● BBRv1, bas débit, OPENSAND :

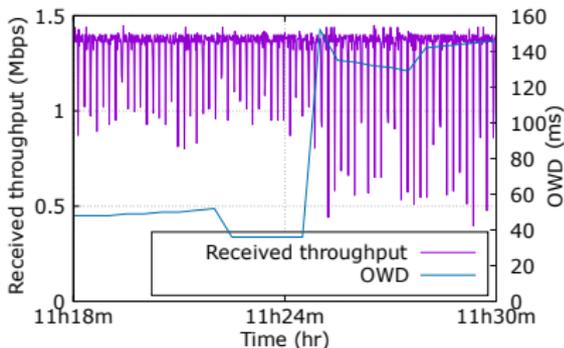


Figure 27: Zoom couture débit reçu, BBRv1 sous OPENSAND, bas débit

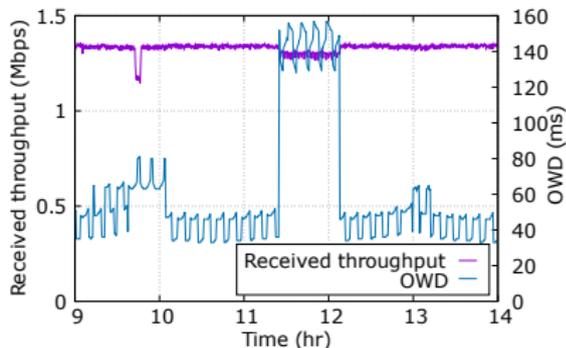


Figure 28: Débit reçu, BBRv1 sous OPENSAND, bas débit

→ BBRv1 plus stable que CUBIC, mais variation du débit.

↪ Stabilité : *Probe BW*.

↪ Variations : *Probe RTT* toutes les 10s.

Impact de la variation de délai

● CUBIC, haut débit, OPENSAND :

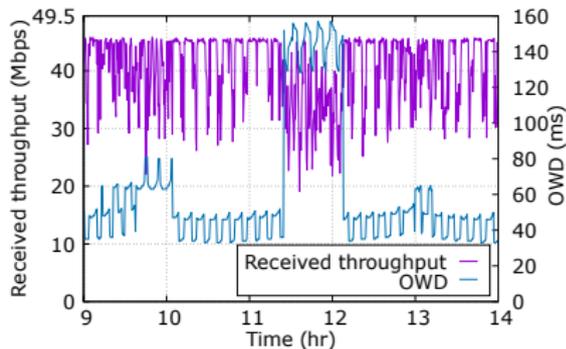


Figure 29: Débit reçu, CUBIC sous OPENSAND, haut débit

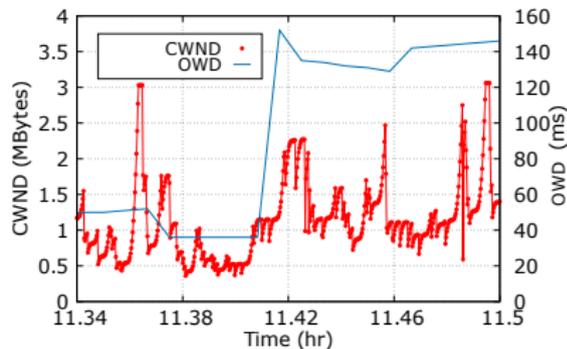


Figure 30: Zoom couture CWND, CUBIC sous OPENSAND, haut débit

- CUBIC pas aussi performant qu'en bas débit.
- Fluctuations du débit ⇒ Variations intra- et inter-orbitales ⇒ Délai diminue ⇒ Diminution brusque du BDP ⇒ Pertes ⇒ Réduction CWND.
- Couture, OWD 40 ms à 145 ms, CWND n'augmente pas.

Impact de la variation de délai

● BBRv1, haut débit, OPENSAND :

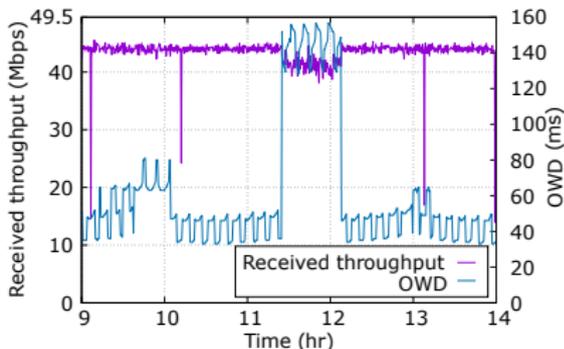


Figure 31: Débit reçu, BBRv1 sous OPENSAND, haut débit

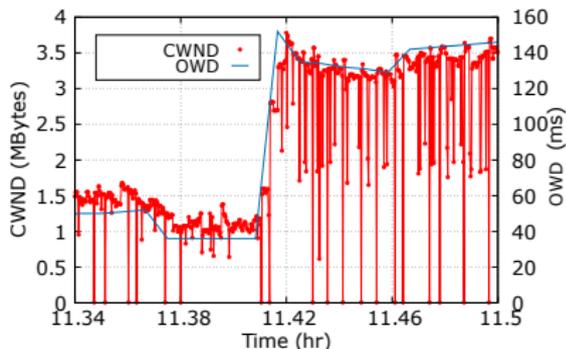


Figure 32: Zoom couture CWND, BBRv1 sous OPENSAND, haut débit

- BBRv1 fait mieux que CUBIC.
- Couture, augmentation délai ⇒ Pertes en débit, tout comme en bas débit.
- CWND suit l'OWD. Diminution débit, *Probe* RTT.

BBRv1 critiqué pour son manque d'équité.

⇒ Évaluations ultérieures avec la nouvelle version de BBR, censée être plus équitable que BBRv1.

⇒ Équité, car performances différentes pour différentes variantes de TCP, encore largement déployées.

Table des matières

- 1 Contexte
- 2 Environnement système
- 3 Impact de la var. de délai
- 4 Équité pour Cubic et BBRv2
- 5 Conclusions

Paramètres

- TCP CUBIC / BBRv2
- Capacité de la file : $= \alpha \times \text{BDP}$
où $\text{BDP} = 2 \times \text{OWD} \times \text{Débit}$
- Débits Up/Down-links : Haut débit : 49.5 Mbit/s
- Débits ISLs : Haut débit : 825 Mbit/s
- Nombre de flux : 2
- Topologie en Dumbbell : Source - Destination : Londres - Atlantique
- Outil : OPENSAND

→ OWD :

→ constant = $\begin{cases} 25\text{ms (min hors-couture)} \\ 143\text{ms (max sous la couture)} \end{cases}$

→ variable

→ RTTs :

→ égaux

→ différents

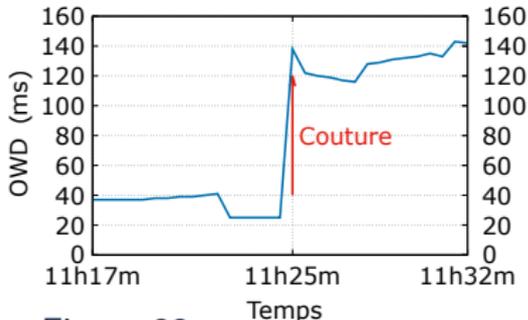


Figure 33: OWD passage par la couture

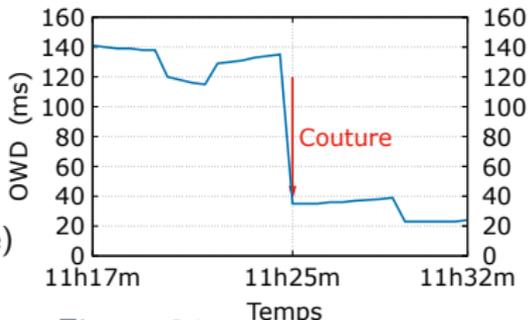


Figure 34: OWD sortie de la couture

Partage inter-protocolaire

- OWD constants = 25 ms, RTTs égaux :

Capacité des Buffers (paquets)	11	21	42	104	207	414
α	0.05	0.1	0.2	0.5	1	2
Débit Cubic (Mbit/s)	4.1	8.9	18.8	32.5	32.5	34.7
Débit BBRv2 (Mbit/s)	2.3	4.8	8.4	10.2	10.2	8.9
Débit total (Mbit/s)	6.4	13.7	27.2	42.6	42.6	43.57

Table 4: Débits reçus, CUBIC vs BBRv2, OWD = 25 ms, RTTs égaux

- OWD constants = 143 ms, RTTs égaux :

Capacité des buffers (paquets)	59	118	236	400	590	1180	2360
α	0.05	0.1	0.2	0.34	0.5	1	2
Débit Cubic (Mbit/s)	6.4	9.1	14.4	20.0	26.1	31.8	28.5
Débit BBRv2 (Mbit/s)	26.2	26.4	23.8	21.0	15.5	10.6	14.3
Débit total (Mbit/s)	32.6	35.5	38.2	41.0	41.5	42.4	42.8

Table 5: Débits reçus, CUBIC vs BBRv2, OWD = 143 ms, RTTs égaux

Partage inter-protocolaire

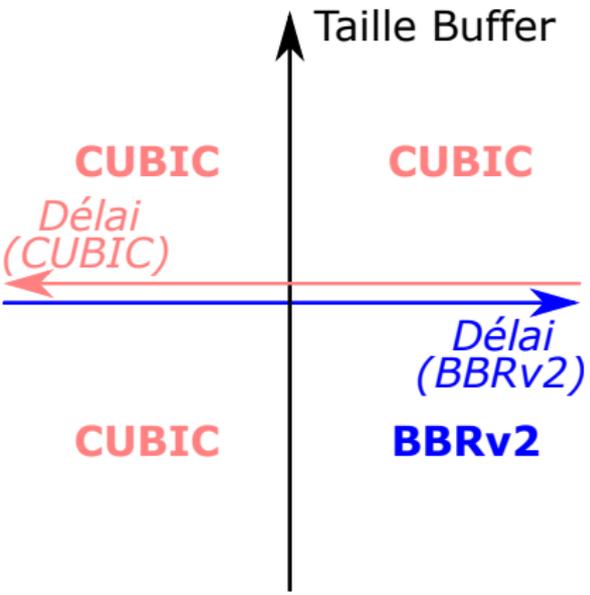


Figure 35: À RTTs différents

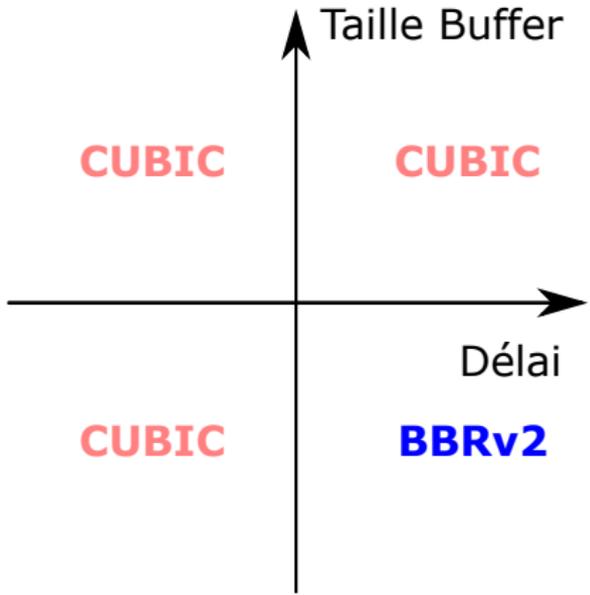


Figure 36: À RTTs égaux

Partage intra-protocolaire

- CUBIC, RTTs différents, OWD variables :

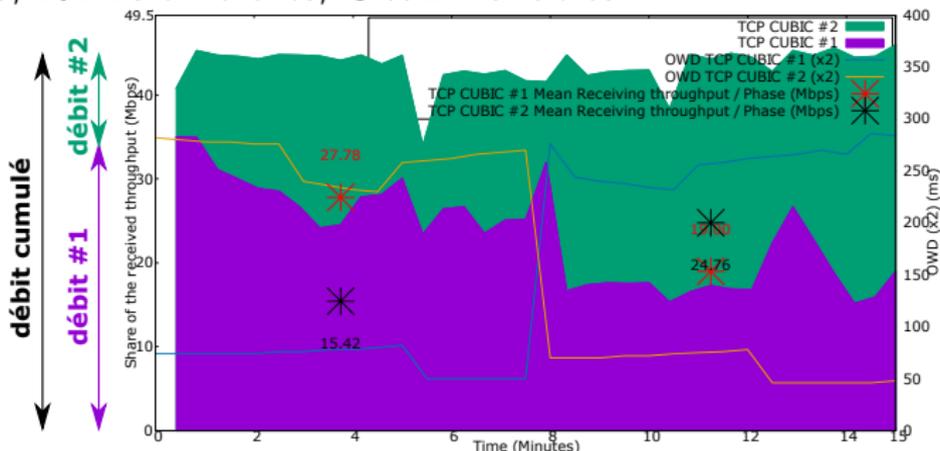


Figure 37: Débits reçus pour deux flux CUBIC à RTT variables différents, haut débit

→ À RTTs identiques, équité

→ À RTTs différents, le flux CUBIC dont le RTT est le plus petit l'emporte :

$W(t) = C(t - K)^3 + W_{max}$ et le paramètre K .

→ À RTTs différents, le flux BBRv2 dont le RTT est le plus important l'emporte.

Table des matières

- ① Contexte
- ② Environnement système
- ③ Impact de la var. de délai
- ④ Équité pour Cubic et BBRv2
- ⑤ Conclusions

Conclusions (1/2)

- Regain d'intérêt dans les constellations de sats ces dernières années, *Iridium NEXT*.
- Évolution d'algo TCP, CUBIC et BBR.
 - ↔ Impact des caractéristiques inhérentes des constellations de satellites sur la variation de délais engendrée sur TCP.
 - ↔ 4 sources de variations de délai étudiées : variation d'élévation, délais du *handover* intra-orbital et inter-orbital, et délai dû au *handover* de la couture.
 - ↔ Facteurs de variation fréquents mais de faible amplitude, et vice-versa.
- CUBIC, fondé sur les pertes, peut souffrir de ces variations de délai.
- BBRv1, hybride, semble être plus efficace.
 - ↔ Différents comportements des différents algorithmes TCP.
 - ↔ BBRv1 critiqué pour son manque d'équité.

Conclusions (2/2)

- Étude de l'équité CUBIC BBRv2
- Partage inter-protocolaire :
 - ↪ CUBIC.
 - ↪ Sauf pour OWD important et capacité du *buffer* assez petite.
- Partage intra-protocolaire :
 - ↪ À RTT identiques, équité existe pour BBRv2 ou CUBIC.
 - ↪ À RTT différents, pour BBRv2 le flux dont le RTT est le plus important domine.
 - ↪ Pour CUBIC, à RTT différents, le flux dont le RTT est le plus petit l'emporte.

Perspectives

- Trafic plus hétérogène, flux courts et un nombre de flux plus important.
- Vraie grandeur, par exemple un vrai accès *Iridium NEXT*.
- Gestion des classes de service plus diverse.

BBRv2 peut utiliser ECN du type DCTCP/L4S [6, 4, 12], tandis que par exemple CUBIC utilise ECN standard RFC 3168 [7].

↔ Impact de marquages ECN différents sur l'équité entre BBRv2 et CUBIC.

- AQM plus complexe que le *Drop Tail*.
- D'autres algorithmes dans un contexte de constellation de satellites, notamment QUIC.
- Caractéristiques des méga-constellations de satellites et impact sur les protocoles considérés.

Merci pour votre attention ! 😊

Contribution

A. Boubaker et al. “On the Impact of Intrinsic Delay Variation Sources on Iridium LEO Constellation”. In: *International Conference on Wireless and Satellite Systems (WiSATS)*. Springer. Sept. 2020, pp. 206–226. DOI: 10.1007/978-3-030-69069-4_18

Backup Slides

Partage inter-protocolaire

- OWD variables, RTTs égaux :
 - Modélisation *buffers* à OWD = 25 ms :
 - Hors-couture : CUBIC
 - Sous la couture : BBRv2
 - Modélisation *buffers* à OWD = 143 ms :
 - *Buffers* > 118 paquets : CUBIC
 - *Buffers* < 118 :
 - Hors couture : CUBIC
 - Sous la couture : BBRv2

Partage intra-protocolaire

- BBRv2, RTTs différents, OWD constants :

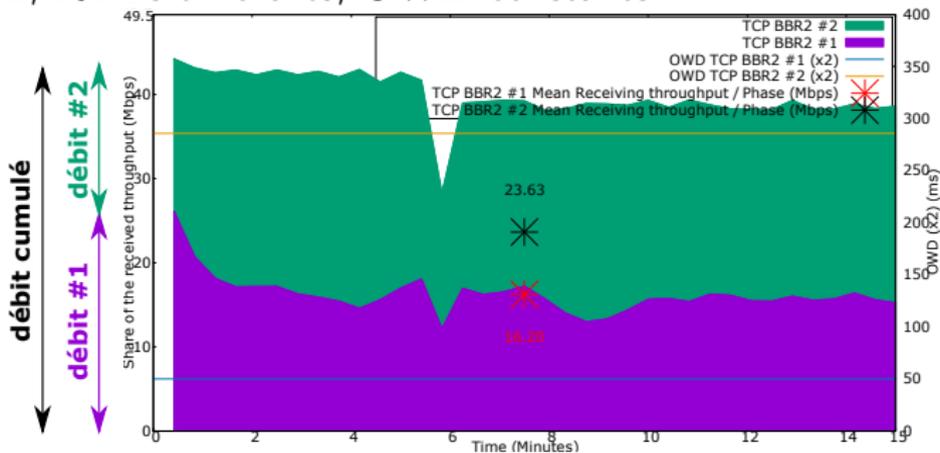


Figure 38: Débits reçus pour deux flux BBRv2 à RTT constants différents, haut débit

→ À RTTs identiques, équité

→ À RTTs différents, le flux BBRv2 dont le RTT est le plus important l'emporte.

Problèmes TCP : terrestre

→ **Congestion** : ressources réseau limitées (temps de traitement des routeurs, débit du lien).

Problèmes TCP : terrestre

- **Congestion** : ressources réseau limitées (temps de traitement des routeurs, débit du lien).
 - Symptômes : retransmissions intempestives, des paquets non remis, des fragmentations, des délais et/ou gigue.

Problèmes TCP : terrestre

- **Congestion** : ressources réseau limitées (temps de traitement des routeurs, débit du lien).
 - Symptômes : retransmissions intempestives, des paquets non remis, des fragmentations, des délais et/ou gigue.
 - Solutions :
 - ↔ CC et CA pour moduler l'entrée du trafic et donc éviter l'effondrement du réseau.
 - ↔ Utilisation de l'option ECN et de l'AQM.

Problèmes TCP : terrestre

- **Congestion** : ressources réseau limitées (temps de traitement des routeurs, débit du lien).
 - Symptômes : retransmissions intempestives, des paquets non remis, des fragmentations, des délais et/ou gigue.
 - Solutions :
 - ↔ CC et CA pour moduler l'entrée du trafic et donc éviter l'effondrement du réseau.
 - ↔ Utilisation de l'option ECN et de l'AQM.
- **Équité** : grande diversité des solutions TCP et de chemin dans le réseau (impliquant une inégalité des délais) induit un partage dynamique des ressources du réseau.

Problèmes TCP : terrestre

- **Congestion** : ressources réseau limitées (temps de traitement des routeurs, débit du lien).
 - Symptômes : retransmissions intempestives, des paquets non remis, des fragmentations, des délais et/ou gigue.
 - Solutions :
 - ↔ CC et CA pour moduler l'entrée du trafic et donc éviter l'effondrement du réseau.
 - ↔ Utilisation de l'option ECN et de l'AQM.
- **Équité** : grande diversité des solutions TCP et de chemin dans le réseau (impliquant une inégalité des délais) induit un partage dynamique des ressources du réseau.
 - Solution :
 - ↔ Techniques et mécanismes de *scheduling* d'AQM.
 - ↔ Dimensionnement du *buffer* peut jouer un rôle dans l'équité pour certaines variantes de TCP (e.g. BBR).

Problèmes TCP : terrestre

- **Congestion** : ressources réseau limitées (temps de traitement des routeurs, débit du lien).
 - Symptômes : retransmissions intempestives, des paquets non remis, des fragmentations, des délais et/ou gigue.
 - Solutions :
 - ↔ CC et CA pour moduler l'entrée du trafic et donc éviter l'effondrement du réseau.
 - ↔ Utilisation de l'option ECN et de l'AQM.
- **Équité** : grande diversité des solutions TCP et de chemin dans le réseau (impliquant une inégalité des délais) induit un partage dynamique des ressources du réseau.
 - Solution :
 - ↔ Techniques et mécanismes de *scheduling* d'AQM.
 - ↔ Dimensionnement du *buffer* peut jouer un rôle dans l'équité pour certaines variantes de TCP (e.g. BBR).
- **Latence** : certaines applications exigeantes en termes de latence.

Problèmes TCP : terrestre

- **Congestion** : ressources réseau limitées (temps de traitement des routeurs, débit du lien).
 - Symptômes : retransmissions intempestives, des paquets non remis, des fragmentations, des délais et/ou gigue.
 - Solutions :
 - ↪ CC et CA pour moduler l'entrée du trafic et donc éviter l'effondrement du réseau.
 - ↪ Utilisation de l'option ECN et de l'AQM.
- **Équité** : grande diversité des solutions TCP et de chemin dans le réseau (impliquant une inégalité des délais) induit un partage dynamique des ressources du réseau.
 - Solution :
 - ↪ Techniques et mécanismes de *scheduling* d'AQM.
 - ↪ Dimensionnement du *buffer* peut jouer un rôle dans l'équité pour certaines variantes de TCP (e.g. BBR).
- **Latence** : certaines applications exigeantes en termes de latence.
 - Causes :
 - ↪ Établissement de la connexion : *3-way handshake*
 - ↪ *Bufferisation*
 - ↪ *Overhead*

Problèmes TCP : terrestre

- **Congestion** : ressources réseau limitées (temps de traitement des routeurs, débit du lien).
 - Symptômes : retransmissions intempestives, des paquets non remis, des fragmentations, des délais et/ou gigue.
 - Solutions :
 - ↔ CC et CA pour moduler l'entrée du trafic et donc éviter l'effondrement du réseau.
 - ↔ Utilisation de l'option ECN et de l'AQM.
- **Équité** : grande diversité des solutions TCP et de chemin dans le réseau (impliquant une inégalité des délais) induit un partage dynamique des ressources du réseau.
 - Solution :
 - ↔ Techniques et mécanismes de *scheduling* d'AQM.
 - ↔ Dimensionnement du *buffer* peut jouer un rôle dans l'équité pour certaines variantes de TCP (e.g. BBR).
- **Latence** : certaines applications exigeantes en termes de latence.
 - Causes :
 - ↔ Établissement de la connexion : *3-way handshake*
 - ↔ *Bufferisation*
 - ↔ *Overhead*
 - Solutions :
 - ↔ Établissement de connexion : TFO (économiser un RTT du *handshake*), MPTCP (plusieurs connexions TCP ouvertes simultanément).
 - ↔ *Bufferisation* : *pacing* (éviter les transmissions sporadiques), conception judicieuse du *buffer*, AQM (limiter et prévenir les débordements de *buffer* et ainsi éviter le *bufferbloat*).
 - ↔ *Overhead* : Optimisation de l'utilisation de la bande avec les différents mécanismes tels que DELACK et SACK.

Problèmes TCP : satellite

→ **LFNs** : une constellation de satellites LEO peut être considérée comme un LFN ($BDP > 10^5$ bits).

Problèmes TCP : satellite

- **LFNs** : une constellation de satellites LEO peut être considérée comme un LFN ($BDP > 10^5$ bits).
- **Taille maximale de la fenêtre** : taille max de la fenêtre = 65535 octets, peut être atteinte.

Problèmes TCP : satellite

- **LFNs** : une constellation de satellites LEO peut être considérée comme un LFN ($BDP > 10^5$ bits).
- **Taille maximale de la fenêtre** : taille max de la fenêtre = 65535 octets, peut être atteinte.
 - ↪ Problème corrigé [1], permettant des fenêtres plus grandes.
 - ↪ Mécanisme activé dans les principaux systèmes d'exploitation.

Problèmes TCP : satellite

- **LFNs** : une constellation de satellites LEO peut être considérée comme un LFN ($BDP > 10^5$ bits).
 - **Taille maximale de la fenêtre** : taille max de la fenêtre = 65535 octets, peut être atteinte.
 - ↪ Problème corrigé [1], permettant des fenêtres plus grandes.
 - ↪ Mécanisme activé dans les principaux systèmes d'exploitation.
 - **Accusés de réception cumulatifs** : à la détection des pertes, aucune information sur la bonne réception des paquets suivants ⇒ retransmissions inutiles.

Problèmes TCP : satellite

- **LFNs** : une constellation de satellites LEO peut être considérée comme un LFN ($BDP > 10^5$ bits).
 - **Taille maximale de la fenêtre** : taille max de la fenêtre = 65535 octets, peut être atteinte.
 - ↔ Problème corrigé [1], permettant des fenêtres plus grandes.
 - ↔ Mécanisme activé dans les principaux systèmes d'exploitation.
 - **Accusés de réception cumulatifs** : à la détection des pertes, aucune information sur la bonne réception des paquets suivants ⇒ retransmissions inutiles. D'où l'introduction de l'option SACK.

Problèmes TCP : satellite

- **LFNs** : une constellation de satellites LEO peut être considérée comme un LFN ($BDP > 10^5$ bits).
 - **Taille maximale de la fenêtre** : taille max de la fenêtre = 65535 octets, peut être atteinte.
 - ↔ Problème corrigé [1], permettant des fenêtres plus grandes.
 - ↔ Mécanisme activé dans les principaux systèmes d'exploitation.
 - **Accusés de réception cumulatifs** : à la détection des pertes, aucune information sur la bonne réception des paquets suivants ⇒ retransmissions inutiles. D'où l'introduction de l'option SACK.
 - **Variation de délai** :

Problèmes TCP : satellite

- **LFNs** : une constellation de satellites LEO peut être considérée comme un LFN ($BDP > 10^5$ bits).
 - **Taille maximale de la fenêtre** : taille max de la fenêtre = 65535 octets, peut être atteinte.
 - ↪ Problème corrigé [1], permettant des fenêtres plus grandes.
 - ↪ Mécanisme activé dans les principaux systèmes d'exploitation.
 - **Accusés de réception cumulatifs** : à la détection des pertes, aucune information sur la bonne réception des paquets suivants ⇒ retransmissions inutiles. D'où l'introduction de l'option SACK.
 - **Variation de délai** :
 - **Estimation du RTT** : RTT difficile à estimer, TCP ne peut pas réagir correctement aux changements des conditions de trafic. Pertes de paquets et retransmissions envoyées, difficile de savoir si la réponse concerne la première instance du paquet ou une instance ultérieure (une retransmission).

Problèmes TCP : satellite

- **LFNs** : une constellation de satellites LEO peut être considérée comme un LFN ($BDP > 10^5$ bits).
 - **Taille maximale de la fenêtre** : taille max de la fenêtre = 65535 octets, peut être atteinte.
 - ↔ Problème corrigé [1], permettant des fenêtres plus grandes.
 - ↔ Mécanisme activé dans les principaux systèmes d'exploitation.
 - **Accusés de réception cumulatifs** : à la détection des pertes, aucune information sur la bonne réception des paquets suivants ⇒ retransmissions inutiles. D'où l'introduction de l'option SACK.
- **Variation de délai** :
 - **Estimation du RTT** : RTT difficile à estimer, TCP ne peut pas réagir correctement aux changements des conditions de trafic. Pertes de paquets et retransmissions envoyées, difficile de savoir si la réponse concerne la première instance du paquet ou une instance ultérieure (une retransmission).
 - ↔ Introduction de l'option TCP *timestamp* pour contrer ce problème.

Problèmes TCP : satellite

- **LFNs** : une constellation de satellites LEO peut être considérée comme un LFN ($BDP > 10^5$ bits).
 - **Taille maximale de la fenêtre** : taille max de la fenêtre = 65535 octets, peut être atteinte.
 - ↪ Problème corrigé [1], permettant des fenêtres plus grandes.
 - ↪ Mécanisme activé dans les principaux systèmes d'exploitation.
 - **Accusés de réception cumulatifs** : à la détection des pertes, aucune information sur la bonne réception des paquets suivants ⇒ retransmissions inutiles. D'où l'introduction de l'option SACK.
- **Variation de délai** :
 - **Estimation du RTT** : RTT difficile à estimer, TCP ne peut pas réagir correctement aux changements des conditions de trafic. Pertes de paquets et retransmissions envoyées, difficile de savoir si la réponse concerne la première instance du paquet ou une instance ultérieure (une retransmission).
 - ↪ Introduction de l'option TCP *timestamp* pour contrer ce problème.
 - **Déclenchement du RTO** : difficulté d'une estimation actualisée du RTT, difficulté donc du calcul du RTO. Valeur du temporisateur calculée et mise à jour pendant la transmission, afin de s'adapter à l'évolution du RTT et de la gigue.

Problèmes TCP : satellite

- **LFNs** : une constellation de satellites LEO peut être considérée comme un LFN ($BDP > 10^5$ bits).
 - **Taille maximale de la fenêtre** : taille max de la fenêtre = 65535 octets, peut être atteinte.
 - ↪ Problème corrigé [1], permettant des fenêtres plus grandes.
 - ↪ Mécanisme activé dans les principaux systèmes d'exploitation.
 - **Accusés de réception cumulatifs** : à la détection des pertes, aucune information sur la bonne réception des paquets suivants ⇒ retransmissions inutiles. D'où l'introduction de l'option SACK.
 - **Variation de délai** :
 - **Estimation du RTT** : RTT difficile à estimer, TCP ne peut pas réagir correctement aux changements des conditions de trafic. Pertes de paquets et retransmissions envoyées, difficile de savoir si la réponse concerne la première instance du paquet ou une instance ultérieure (une retransmission).
 - ↪ Introduction de l'option TCP *timestamp* pour contrer ce problème.
 - **Déclenchement du RTO** : difficulté d'une estimation actualisée du RTT, difficulté donc du calcul du RTO. Valeur du temporisateur calculée et mise à jour pendant la transmission, afin de s'adapter à l'évolution du RTT et de la gigue.
 - **Déséquencement** : peut être causé par les changements de délais inhérents à la constellation de satellites.
 - Provoque de multiples DUPACKs avant l'arrivée du ou des paquets manquants ou de plusieurs retransmissions.

Problèmes TCP : satellite

- **LFNs** : une constellation de satellites LEO peut être considérée comme un LFN ($BDP > 10^5$ bits).
 - **Taille maximale de la fenêtre** : taille max de la fenêtre = 65535 octets, peut être atteinte.
 - ↪ Problème corrigé [1], permettant des fenêtres plus grandes.
 - ↪ Mécanisme activé dans les principaux systèmes d'exploitation.
 - **Accusés de réception cumulatifs** : à la détection des pertes, aucune information sur la bonne réception des paquets suivants ⇒ retransmissions inutiles. D'où l'introduction de l'option SACK.
 - **Variation de délai** :
 - **Estimation du RTT** : RTT difficile à estimer, TCP ne peut pas réagir correctement aux changements des conditions de trafic. Pertes de paquets et retransmissions envoyées, difficile de savoir si la réponse concerne la première instance du paquet ou une instance ultérieure (une retransmission).
 - ↪ Introduction de l'option TCP *timestamp* pour contrer ce problème.
 - **Déclenchement du RTO** : difficulté d'une estimation actualisée du RTT, difficulté donc du calcul du RTO. Valeur du temporisateur calculée et mise à jour pendant la transmission, afin de s'adapter à l'évolution du RTT et de la gigue.
 - **Déséquencement** : peut être causé par les changements de délais inhérents à la constellation de satellites.
 - Provoque de multiples DUPACKs avant l'arrivée du ou des paquets manquants ou de plusieurs retransmissions.
 - ↪ L'utilisation de l'option SACK permet de réduire le nombre de retransmissions en ré-émettant que les paquets qui ont été détectés comme perdus.