



MESURER LES DEBITS SUR LIEN SATELLITAIRE

1. Document Control

Field	Information
Document Title	MESURER_LES_DEBITS_SAT_LEO
Version	2.0
Status	Draft
Owner	Marc Soulacroup
Approved By	Benoit Gendron
Approval Date	06/07/2026
Review Cycle	Annual
Classification	Commercial in Confidence

2. Revision History

Revision	Date	Author	Description
v1	06/07/2026	MS/BG	Lien satellitaire sans trafic
v2	06/07/2026	MS	Relecture terminologie



3. Table des Matières

1. Document Control 1
2. Revision History 1
3. Table des Matières 2
4. Pourquoi mesurer les débits ? 3
5. Comment mesurer ? les 2 méthodes iPerf3 & LIFBE 4
 - 5.1 Principe général de iPerf3 4
 - 5.2 Principe général de LIFBE 6
 - 5.3 Différences clé entre iPerf3 et LIFBE 7
6. iPerf3 (UDP) et LIFBE (UDP) convergent-ils sur un lien satellitaire sans trafic ? 8



Introduction :

L'objet de cette note est de répondre à ces 3 questions :

- Pourquoi mesurer les débits ?
- Comment mesurer ? les 2 méthodes iPerf3 & LIFBE
- Sur un lien satellitaire sans trafic, iPerf3 (UDP) et LIFBE (UDP) sont-ils censés converger ?

4. Pourquoi mesurer les débits ?

Sur un lien satellite LEO, la bande passante disponible n'est pas une constante — elle fluctue en permanence sous l'effet de la charge du faisceau, des handovers de satellites, des conditions météo et de la politique de régulation de l'opérateur (Token Bucket).

Mesurer le débit, c'est donc répondre à une question opérationnelle critique :

- Mon application peut-elle envoyer ses données maintenant, à la qualité et à la performance requise ?
- Mon SLO (Service Level Objective) réseau est-il respecté en ce moment, ou ai-je déjà dépassé le seuil minimum ? Y a-t-il des dégradations en cours ?
- La dégradation que je subis vient-elle du lien satellite, du cœur réseau, de la passerelle au sol ou de mon équipement ?

Sans mesure de débit, le réseau satellite est une boîte noire : on sait qu'il fonctionne quand l'application tourne, et on sait qu'il ne fonctionne plus quand l'application tombe. L'objectif de la mesure est d'anticiper cette dégradation — idéalement 30 à 120 secondes avant qu'elle n'impacte les services et les utilisateurs.

Deux cas d'usage principaux justifient la mesure de débit sur satellite LEO :

Mise en service (commissioning)

Caractériser la capacité maximale du lien (C_e) dans les meilleures conditions : quelle est la performance théorique de cette antenne Starlink ou OneWeb, avec une souscription donnée, dans cette zone géographique, à cette heure, avec cette élévation satellite ? Cette mesure de référence sert de base aux SLA ou SLO contractuels.

Monitoring en production (exploitation continue)

Surveiller en temps réel la bande passante effectivement disponible (A_b) pendant que les applications métier tournent. Détecter les dégradations avant qu'elles ne deviennent des incidents. Corréler les baisses de débit avec les handovers de faisceaux, les pics de charge, le champ de vision (Field of View), les conditions radio (« rain fade ») et les forces du signal (RSRP/RSRQ).



5. Comment mesurer ? les 2 méthodes iPerf3 & LIFBE

5.1 Principe général de iPerf3

iPerf3 est un outil open-source (iperf3.fr) de test de débit réseau, fonctionnant en mode client/serveur. Il génère un flux de données entre deux nœuds IP pour mesurer la capacité maximale théorique du lien (C_e) — c'est-à-dire le débit maximal que le réseau peut transporter quand il est délibérément saturé.

Architecture de la mesure

- Une session de contrôle TCP est établie sur le port 5201 entre client et serveur
- Un ou plusieurs flux de données sont ouverts selon le protocole choisi (TCP ou UDP)
- Le serveur enregistre les bytes reçus par intervalle de temps (défaut : 1 seconde)
- Le débit est calculé : $\text{Débit (bps)} = \text{Volume (bytes)} \times 8 / \text{Durée (s)}$

Caractéristique fondamentale

iPerf3 mesure la capacité maximale théorique (C_e) du lien — pas la bande passante disponible (A_b). Il perturbe délibérément le trafic existant pendant la durée du test en tentant de saturer le lien pour en déterminer sa capacité maximum. Les résultats faibles sont souvent écartés afin d'afficher la valeur obtenue la plus haute possible. C'est un outil de commissioning ponctuel, incompatible avec une utilisation en production continue.

iPerf3 TCP

En mode TCP (mode par défaut), iPerf3 laisse le protocole TCP piloter le débit via son mécanisme de fenêtre de congestion (CWND). Le débit n'est pas fixé à l'avance — il émerge de la négociation entre TCP et le réseau.

Mécanisme — Slow Start TCP

TCP démarre avec une fenêtre de congestion minimale (1 MSS = 1460 bytes) et la double à chaque aller-retour (RTT) tant qu'il ne détecte pas de perte de paquet. Cette phase de montée en charge (Slow Start) précède la saturation progressive du lien.

- RTT 1 : CWND = 1 MSS → débit faible
- RTT 2 : CWND = 2 MSS → débit x 2
- RTT 3 : CWND = 4 MSS → débit x 4
- ... : CWND = N MSS → saturation du lien (C_e atteint)

Limites en contexte satellite LEO

- RTT élevé (40-80 ms LEO, 600 ms GEO) : Slow Start très lent — TCP peut ne pas atteindre la saturation en 10 secondes, sous-estimant C_e
- Token Bucket opérateur : TCP remplit le burst autorisé puis subit le bridage — la moyenne affichée mélange burst et débit contractuel



- Pas de mesure de latence : le serveur utilise uniquement son horloge locale, sans synchronisation avec le client

iPerf3 UDP

En mode UDP (option -u), le débit d'envoi est fixé a priori par l'opérateur via le paramètre -b. Il n'y a pas de Slow Start, pas de contrôle de flux : iPerf3 envoie au débit spécifié, quelles que soient les conditions réseau.

Métriques mesurées en UDP

- Débit effectivement reçu (vérification que -b est bien atteint)
- Perte de paquets (%) — métrique principale en UDP
- Gigue (jitter) — calculée via les timestamps embarqués dans chaque datagramme UDP
- Paquets hors ordre



5.2 Principe général de LIFBE

LIFBE (Low Intrusive Fast Bandwidth Estimation) est une méthode brevetée (EP 2 862 324 B1, Orange Innovation / inventeur : Laurent Musso, industrialisée et maintenue par LatenceTech) d'estimation de la bande passante disponible (Ab) sur tout lien IP, filaire ou sans-fil.

Objectif

Mesurer $Ab = Ce - Rx$ en temps réel, sans perturber le trafic existant, sans connaissance préalable de la capacité du lien.

Principe en 4 étapes

- Étape 1 : envoi d'un unique train de 20 à 50 sondes UDP légères (≈ 73 Ko total)
- Étape 2 : le récepteur horodate chaque sonde à l'arrivée et calcule les délais reçus cumulés
- Étape 3 : détection des valeurs atypiques de gigue par méthode de la boîte à moustaches (box plot)
- Étape 4 : régression par morceaux sur les délais cumulés pour identifier le breakpoint — le moment où les files d'attente commencent à se former, révélant Ab

Deux modes selon la disponibilité de Ce

Mode 1 (Ce connue) : débit de sondes constant, régression linéaire. Ce est obtenue par scan radio MCS ou commande AT 3GPP AT+CGEQNEG. Formule : $Ab = Ce(1 - a/L \times \text{sendrate}) + \text{sendrate}$.

Mode 2 (Ce inconnue) : débit de sondes croissant, régression non linéaire LMA. Ce et Ab sont déduites simultanément à partir du breakpoint — sans aucune connaissance a priori de l'infrastructure.

Avantage sur satellite LEO

La mesure s'effectue en moins d'une milliseconde (durée du train de sondes), rendant LIFBE quasi-instantané face aux variations rapides du canal satellite. Il peut être déclenché toutes les 30 secondes en production sans impact sur le trafic applicatif — à l'opposé d'iPerf3 qui perturbe le réseau pendant 10 secondes minimum.

Limite connue sur satellite LEO

Le Token Bucket opérateur : le train de 50 sondes peut passer entièrement dans la fenêtre de burst autorisée avant que le bridage ne s'active, conduisant à surestimer Ab . Contournement : utiliser un flux parallèle saturant au préalable, ou augmenter le nombre de sondes pour dépasser la fenêtre de burst.



5.3 Différences clé entre iPerf3 et LIFBE

iPerf3 UDP et LIFBE partagent le même protocole de transport (UDP) et le même principe de timestamp par paquet. Mais iPerf3 UDP pose la question : « quelle est la qualité du lien si j'injecte X Gbps ? » — en saturant ou chargeant fortement le réseau. LIFBE pose la question : « quelle est la bande passante disponible sans rien imposer ? » — avec seulement 20 à 50 sondes légères.

Limite sur satellite LEO en mode UDP

Le paramètre -b doit être calibré a priori, ce qui suppose de connaître approximativement C_e . Trop bas : pas de congestion, mesure non représentative. Trop haut : saturation et pertes massives. De plus, le Token Bucket opérateur peut fausser la mesure si -b ne dépasse pas le seuil de déclenchement du bridage.



6. iPerf3 (UDP) et LIFBE (UDP) convergent-ils sur un lien satellitaire sans trafic ?

C'est une question très précise qui touche au cœur des deux méthodes. La réponse est oui, mais avec des nuances importantes.

Le cas idéal : lien satellite vide, pas de cross-traffic

Si $R_x = 0$ (aucun autre trafic), alors : $A_b = C_e - R_x = C_e - 0 = C_e$

La bande passante disponible est égale à la capacité maximale du lien. Les deux outils devraient donc converger vers la même valeur — la capacité C_e du lien satellite.

Mais 3 facteurs physiques propres au satellite créent des divergences

Facteur 1 — La latence de propagation incompressible

Sur un lien LEO (Starlink) : $RTT \approx 40-80$ ms. Sur GEO : $RTT \approx 600$ ms. Cette latence élevée impacte différemment les deux outils :

iPerf3 UDP : envoie à débit fixé par $-b$, indépendamment du RTT ; pas affecté par la latence pour le débit brut.

LIFBE : les délais reçus cumulés intègrent la latence de propagation (D_n), modélisée comme une constante dans la régression ; le breakpoint n'est pas affecté par D_n car c'est une variation de délai qui l'identifie, pas sa valeur absolue.

Facteur 2 — Le Token Bucket de l'opérateur satellite

C'est la divergence la plus probable en pratique :

Capacité physique du transpondeur : 200 Mbps. Token Bucket opérateur : burst autorisé à 200 Mbps puis bridé à 50 Mbps contractuels.

iPerf3 UDP à $-b$ 200M pendant 10s : remplit le burst dès la 1ère seconde, détecte le bridage à partir de la 2e seconde, affiche une moyenne entre burst et débit bridé → résultat : ~ 80 Mbps (trompeur).

LIFBE (50 paquets UDP) : peut passer entièrement dans la fenêtre de burst, ne déclenche jamais le mécanisme de bridage → affiche 200 Mbps (surestimation).

C'est la limite connue de LIFBE sur satellite identifiée — sur un lien vide avec Token Bucket, les deux outils donnent des résultats différents ET tous les deux sont partiellement faux.

Facteur 3 — La variabilité du canal satellite

Même sur un lien « vide », le satellite n'est jamais parfaitement stable :

Handovers de faisceaux (Starlink : toutes les 15-30s) → micro-coupures de quelques ms. iPerf3 UDP comptabilise les pertes de paquets pendant le handover ; LIFBE peut détecter un faux breakpoint si le handover survient pendant le train de 50 sondes.

Conditions météo (pluie, vent) → atténuation du signal, réduction instantanée de C_e . Les deux outils le captent mais à des échelles de temps différentes : iPerf3 moyenne sur 10s, LIFBE snapshot sur <1 ms.



Tableau de synthèse

Condition	iPerf3 UDP	LIFBE	Convergence
Lien vide, pas de Token Bucket	Ce mesuré correctement	Ce mesuré correctement	Oui
Lien vide + Token Bucket	Moyenne burst/bridé	Surestimation (burst)	Non
Handover pendant mesure	Pertes comptabilisées	Faux breakpoint possible	Non
Lien légèrement chargé (Rx > 0)	Sature et écrase Rx	Mesure Ab = Ce - Rx	Non — par conception

Conclusion :

Sur un lien satellite parfaitement vide et sans Token Bucket, les deux outils convergent vers Ce.

Mais ce cas n'existe pratiquement jamais en conditions réelles — un lien satellite est toujours soumis à un Token Bucket opérateur, à des handovers de faisceaux, et à des variabilités météo et radio.

C'est précisément pour cela que la combinaison des deux outils est complémentaire : iPerf3 UDP lors de la mise en service pour caractériser Ce et le comportement du Token Bucket, LIFBE en production continue pour surveiller Ab en temps réel sans perturber le trafic.



ANNEXE

LE « TOKEN BUCKET »

Le Token Bucket est un mécanisme de régulation de débit appliqué par l'opérateur satellite sur chaque terminal — indépendamment de la capacité physique réelle du transpondeur ou du faisceau.

L'image du seau à jetons

Le seau se remplit en permanence à un rythme fixe (ex. 50 Mbps contractuels = 50 millions de bits par seconde ajoutés dans le seau). Le seau a une taille maximale, le burst autorisé (ex. capacité du seau = 200 Mb = 4 secondes de remplissage).

Quand vous envoyez des données : chaque bit consomme un jeton du seau ; tant qu'il reste des jetons, passage au débit physique max (200 Mbps) ; seau vide, débit bridé au débit contractuel (50 Mbps).

Sur un lien Starlink concrètement

Contrat : 100 Mbps. Burst autorisé : 200 Mbps pendant ~2 secondes (seau plein au repos).

t=0s : terminal au repos → seau plein

t=0 → 2s : vous envoyez → passe à 200 Mbps (jetons disponibles)

t=2s : seau vide → bridage → retombe à 100 Mbps contractuels

t=... : seau se remplit progressivement pendant les périodes calmes

Pourquoi le Token Bucket existe sur satellite LEO ?

Partage du faisceau — un faisceau Starlink sert des centaines de terminaux simultanément. Sans régulation, un seul terminal pourrait monopoliser la capacité au détriment des autres.

Garantie contractuelle — l'opérateur s'engage sur un débit moyen (ex. 100 Mbps) et non sur un débit instantané. Le Token Bucket lisse la consommation pour tenir cet engagement sur l'ensemble des abonnés.

Gestion des priorités — les terminaux maritimes professionnels, les terminaux défense, et les abonnés résidentiels ont des profils Token Bucket différents. C'est le mécanisme qui implémente cette différenciation.



Le « CROSS TRAFFIC »

Le cross-traffic sur satellite LEO est particulier car il prend trois formes simultanées et invisibles les unes des autres.

Forme 1 — Partage du faisceau entre terminaux

Capacité du faisceau : 2 Gbps (ex.). Terminaux actifs : 200. Cross-traffic invisible : trafic cumulé des 199 autres terminaux. Ab terminal A : 2 Gbps - trafic des 199 autres = variable. Ce cross-traffic est totalement invisible au niveau IP — LIFBE en mesure l'effet (délais de file d'attente à la passerelle sol) sans pouvoir en identifier la source.

Forme 2 — Congestion à la passerelle sol

La passerelle sol (ground station) concentre le trafic de tous les terminaux du faisceau vers le backbone IP terrestre. C'est souvent le vrai goulot d'étranglement : Faisceau → passerelle sol → lien terrestre → Internet.

Forme 3 — Trafic de signalisation et de gestion

Le satellite lui-même génère du trafic permanent invisible à l'utilisateur : télémétrie orbitale, mises à jour firmware, handover de faisceau, synchronisation NTP.

Ce que LIFBE mesure et ne mesure pas

LIFBE mesure $Ab = Ce - Rx_total$ (où Rx_total = forme 1 + forme 2 + forme 3 cumulées), peu importe la source du cross-traffic. LIFBE ne mesure pas la répartition entre les 3 formes, ni l'identité des terminaux concurrents, ni la charge de la passerelle sol isolément.



La dynamique temporelle spécifique au LEO

En 60 secondes, Ab peut varier du simple au décuple — une mesure iPerf3 de 10 secondes ne capture qu'une fenêtre partielle de cette dynamique.

Ce que l'Analyzer LatenceTech apporte sur satellite LEO

Mesure toutes les 30s sur 24h : profil temporel du cross-traffic (heures de pointe, nuit), détection des handovers de faisceaux (pics de latence P99), caractérisation du Token Bucket opérateur (distribution de Ab), corrélation RSRP/RSRQ avec Ab (signal faible = Ce réduite = Ab réduite), prédiction des dégradations 30-120s avant impact applicatif.

En résumé : le cross-traffic sur satellite LEO est multicouche, dynamique, et entièrement invisible depuis le terminal. LIFBE n'en voit pas les causes — il en mesure les effets en continu, ce qui permet à l'Analyzer LatenceTech de caractériser statistiquement un lien dont la nature même est de varier en permanence.



LIFBE

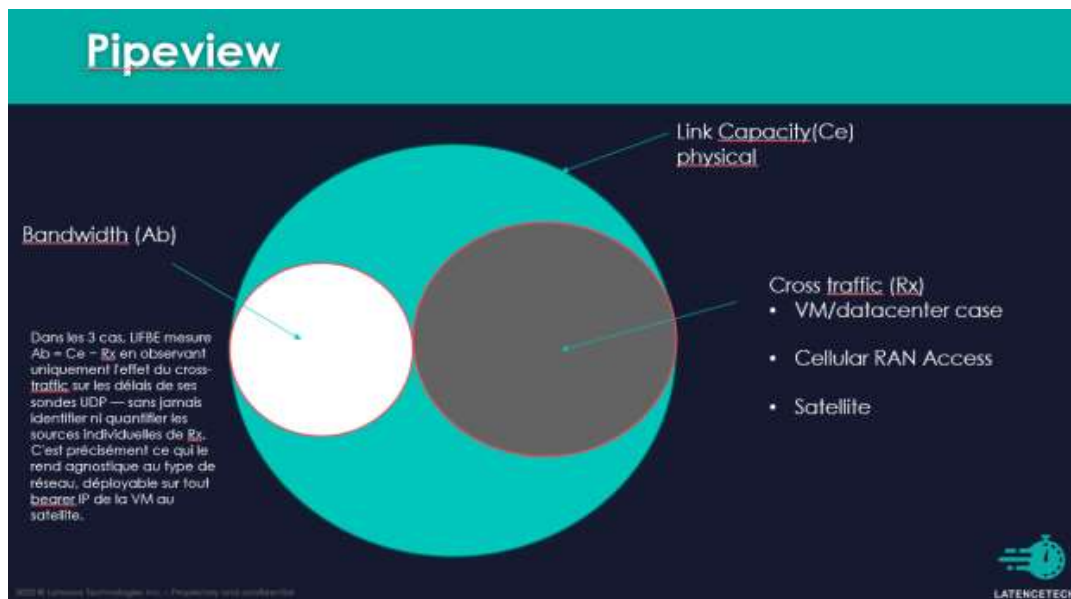
Objectif de LIFBE

LIFBE (Low Intrusive Fast Bandwidth Estimation) a pour objectif d'estimer en temps réel la bande passante effectivement disponible (Ab) sur un lien IP — c'est-à-dire ce qu'une application peut réellement utiliser à l'instant t , déduction faite du trafic existant — sur tout type de réseau filaire ou sans fil, sans perturber le trafic en production.

Principe de mesure

LIFBE envoie un unique train de 20 à 50 sondes UDP légères entre un émetteur et un récepteur, analyse les délais reçus cumulés paquet par paquet via une régression par morceaux, et détecte le point de rupture (breakpoint) auquel les files d'attente commencent à se former — ce changement de comportement des délais révèle directement la bande passante disponible Ab , et dans sa version avancée, la capacité maximale du lien Ce , sans connaissance préalable de l'infrastructure et sans saturer le réseau.

La relation centrale : $Ab = Ce - Rx$



Trois variables, trois réalités physiques distinctes :

Ce — Capacité effective du lien : c'est la taille maximale du tuyau — ce que le support physique peut transporter dans les meilleures conditions, sans aucun autre trafic. Elle dépend uniquement du support physique et de la modulation.

Rx — Cross-traffic (trafic croisé) : c'est tout le trafic IP déjà présent sur le lien, émis par d'autres sources que les sondes LIFBE. LIFBE ne le voit jamais directement — il n'en mesure que l'effet sur ses propres sondes.

Ab — Available Bandwidth (bande passante disponible) : c'est la seule variable qui intéresse réellement l'application. Ce qu'elle peut utiliser maintenant, à cet instant précis, sans perturber le trafic existant.

En trois phrases

Ce est la taille du tuyau — physique, fixe sur fibre, variable sur radio et satellite. Rx est ce que les autres consomment déjà dedans — invisible, jamais mesuré directement. Ab est ce qu'il reste — la seule valeur qui intéresse votre application, que LIFBE déduit en observant comment ses 50 sondes UDP sont retardées, sans jamais avoir besoin de connaître Ce ni Rx séparément.

Configuration de gabarits Starlink & OneWeb pour LIFBE

Valeurs de débit (valeurs max en conditions idéales) des différentes antennes disponibles en laboratoire pour la mise au point des gabarits LIFBE :

Antenne	Débit descendant (DL)	Débit montant (UL)
Starlink Mini	150 Mbps	20 Mbps
Starlink Standard	250 Mbps	25 Mbps
Starlink High Performance	350 Mbps	40 Mbps
Starlink Entreprise	500 Mbps	50 Mbps
OneWeb OW10HL	50 Mbps	10 Mbps

Latence Technologies Inc. — LIFBE (EP 2 862 324 B1) — Commercial in Confidence

