

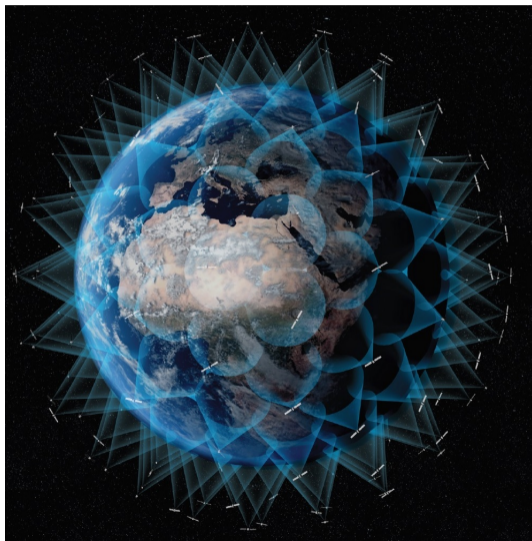
Utilisation de l'IA pour la caractérisation et la gestion des ressources réseau d'une mégaconstellation

Paul Grislain sous la supervision de Emmanuel Lochin et Jean-Yves Tournet



5 mars 2026

Les mégaconstellations



Mégaconstellation

Réseau internet à couverture mondiale composé de stations sol et de satellites (de 200 à 20000)

Crédit : ESA

La congestion : un problème bien réel

"Frais de congestion" : Starlink va-t-il nous faire payer plus là où le réseau est presque saturé ?

Dans certaines parties des États-Unis, où le réseau est congestionné, Starlink demanderait aux nouveaux utilisateurs de payer des "frais de congestion".

Publié le 22 septembre 2024 à 20 h 04 min
Par Setra
@rafayes/shutterstock.com

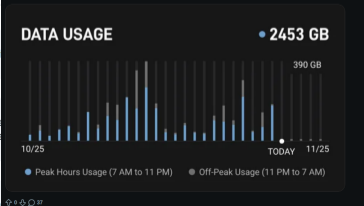
Starlink - Join
Tom Tohill · June 15, 2025 · 2
How do I know if an area is congested? How big is an area? City, state?

Most relevant
Tom Tanner
go to the Starlink website - put in the address where you want your dish and it will tell you if you are in a congested area.
34w
Gord Webster
Starlink does not document the criteria for making an area "Waitlist" or for charging a "demand surcharge". A dummy order on the website using your address will show you if either of those apply.
34w
Dan Steele
The balance due will have an extra \$100 added to the cost prior to paying which is a congestion fee.
37

Starlink's £195 Congestion Charge: What It Means for New Customers in the South East



reddit
r/Starlink · 3y ago
Is there any way to tell if I'm in a "congested" area?



r/Starlink · 1y ago
11Transportation795
100\$ de frais de congestion à mon adresse de service ?

C'est quoi ce problème ? Si j'entre une adresse différente, par exemple si j'utilise l'adresse d'un ami qui n'est pas dans une zone de congestion pour éviter les frais et faire livrer mon équipement là-bas puis aller le chercher, est-ce que ça fonctionnera quand même à mon adresse ?

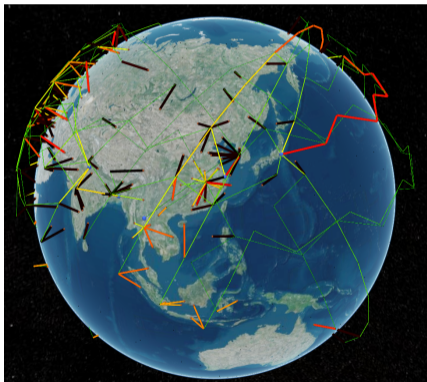
10
1y ago
il est verrouillé à votre adresse, vous ne pourrez pas obtenir de service à une autre adresse à moins d'être dans une zone de congestion. C'est un forfait itinérance.

Starlink Congestion Charge Up to \$1,500. When Will Capacity Increase?

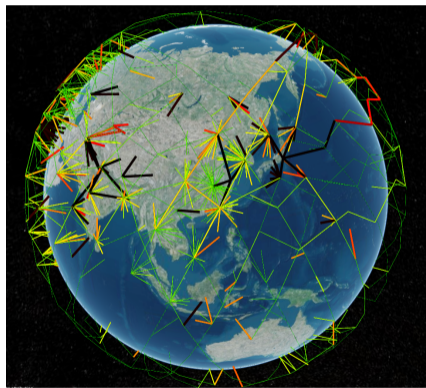
By Andreas Rivera
Jan 27, 2026 · 2 min read
Starlink for residential use has been subject to restrictions and additional fees in regions where there's an abundance of customers connecting to the satellite constellation. | Photo by Jefferys
Starlink continues to charge a demand surcharge for new Residential customers in select regions to control network congestion, but many buyers are shocked that the one-time fee in their area can be up to \$1,500. Several potential buyers reported on social media about the hefty surcharge.
A \$1,500 surcharge is appearing in cities across Alaska, where internet options are few and far between, especially much-sought-after fiber services. So, it's understandable that Starlink is a popular option in the region, with few reliable choices.
Other locations that previously had surcharges of up to \$1,000, such as the Pacific Northwest, have seen

La congestion dans une mégaconstellation

Deux situations d'emplacement des points de congestion :



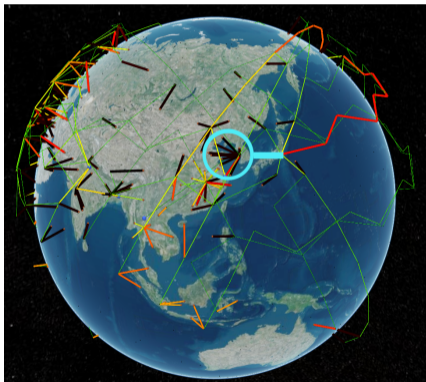
Goulot aux extrémités - condition utilisateur nominale



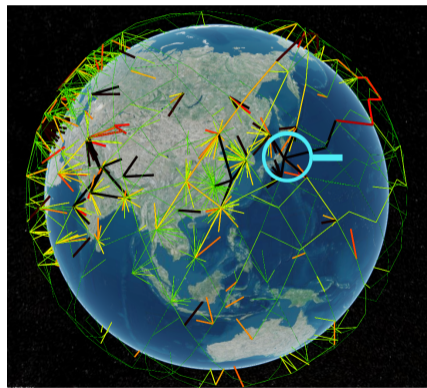
Goulot dans le cœur - condition utilisateur dégradée

La congestion dans une mégaconstellation

Deux situations d'emplacement des points de congestion :

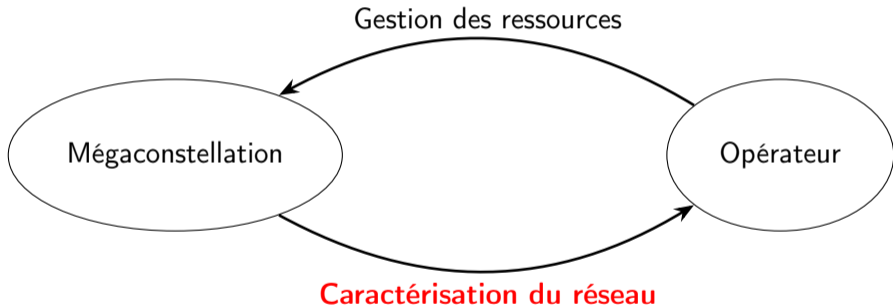


Goulot aux extrémités - condition utilisateur nominale



Goulot dans le cœur - condition utilisateur dégradée

Caractérisation réseau et gestion des ressources



La caractérisation du réseau

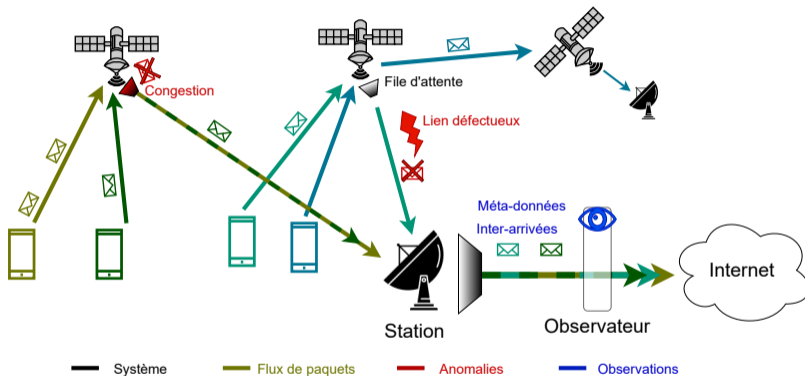
consiste à collecter les informations de l'état du réseau :

- **connaître la topologie** (nœuds, liens, débits, délais)
- **estimer l'utilisation des équipements** (taux d'utilisation des liens, emplacement des goulots, remplissage des files d'attente)

Sommaire

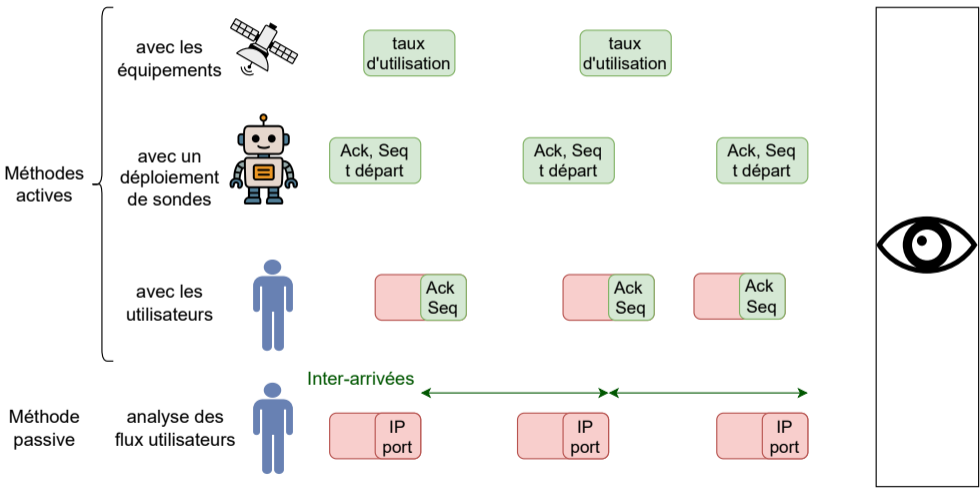
- 1 Mise en place d'un nouvel algorithme
- 2 Analyse réseau : établir un test de présence de file d'attente
- 3 Inférence de topologie par partitionnement de graphe
- 4 Partitionnement robuste par modèle de graphe
- 5 Conclusion

Description du réseau



Un centre d'allocation des ressources gère une portion de réseau constitué d'une ou plusieurs stations sol et de satellites. Un observateur lui est associé pour diagnostiquer l'état du réseau.

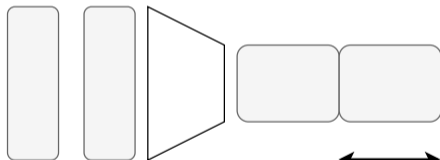
Les méthodes de collecte d'informations



Les inter-arrivées pour la caractérisation du réseau

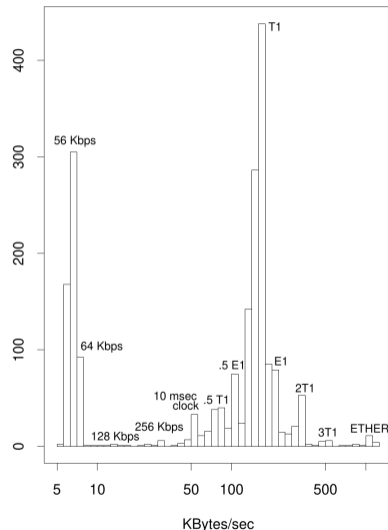
Analyse des inter-arrivées

La distribution des inter-arrivées révèle les débits des files d'attente traversées¹



Δ : inter-arrivée
L : taille d'un paquet
c : débit de la file

$$\Delta = L/c$$



1. V. Paxson *Measurements and analysis of end-to-end Internet dynamics*, 1997.

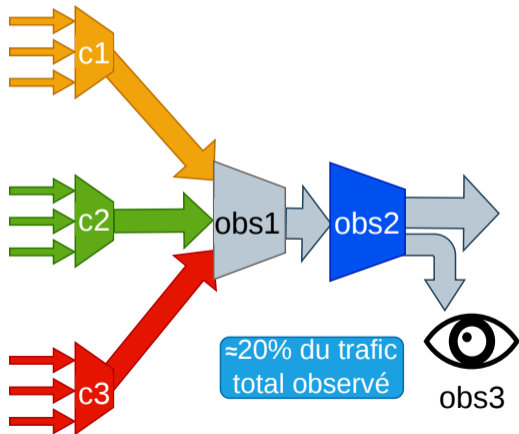
Une nouvelle méthode d'inférence de topologie

	Méthode Katabi ³	Méthode proposée
Principe	Désordre : entropie de Rényi	Ordre partiel : saturation en un seuil donné
Partitionnement	Méthode itérative par agrégation de flux	Calcul parallèle sur des paires de flots puis partitionnement spectral.
Résultat	"Coupe saturée" du réseau	Topologie plus complète

3. D Katabi, I Bazzi and X Yang *A passive approach for detecting shared bottlenecks*, 2001

Illustration de la méthode

Comment identifier la présence des files c1, c2 et c3 ?



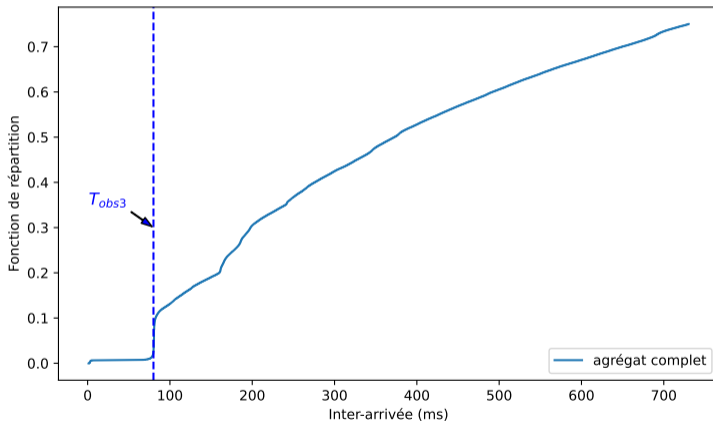
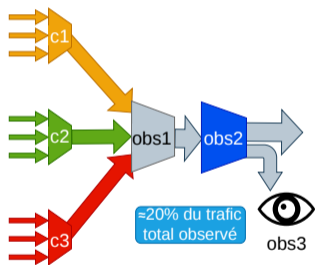
En 3 étapes :

- 1 Estimation du débit de la dernière file commune
- 2 Tests de présence d'une file supplémentaire
- 3 Classification des flux

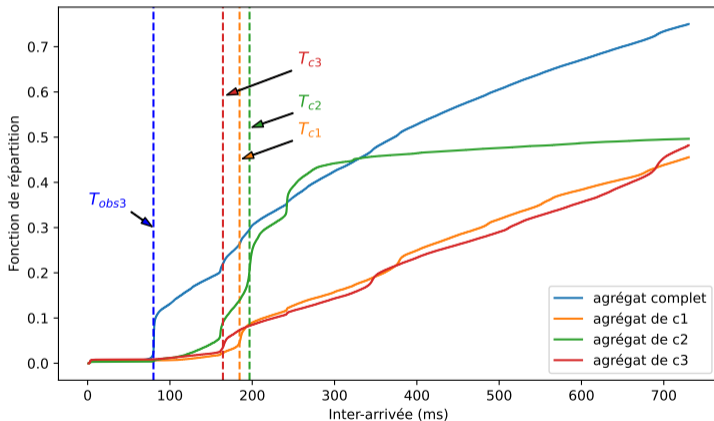
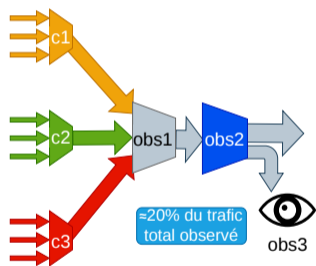
Plan

- 1 Mise en place d'un nouvel algorithme
- 2 Analyse réseau : établir un test de présence de file d'attente
- 3 Inférence de topologie par partitionnement de graphe
- 4 Partitionnement robuste par modèle de graphe
- 5 Conclusion

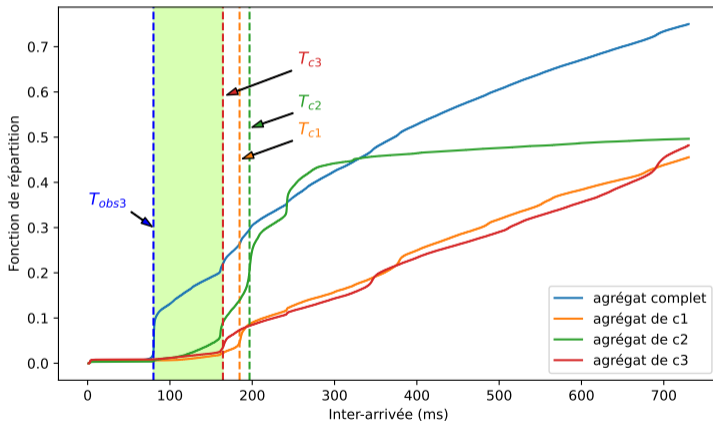
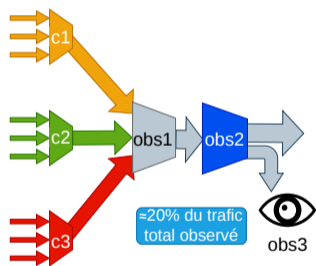
Identification du débit de la file supérieure



Étude des agrégats issus des files amont

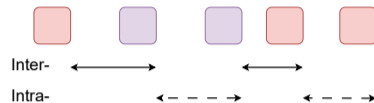


Zone de choix de seuil de test



Inter- & Intra-agrégat

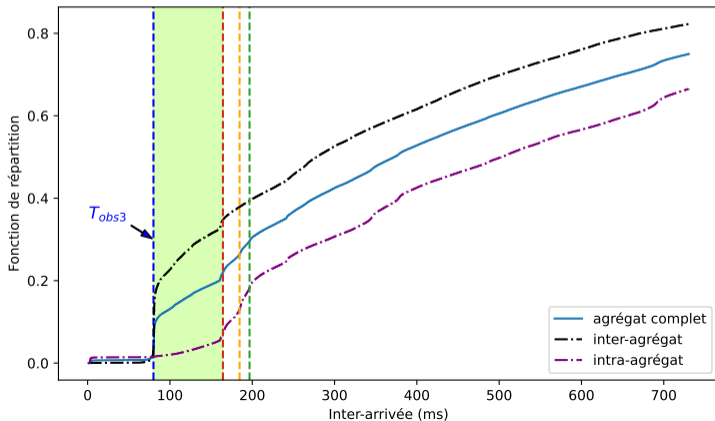
Décomposition des
inter-arrivées :



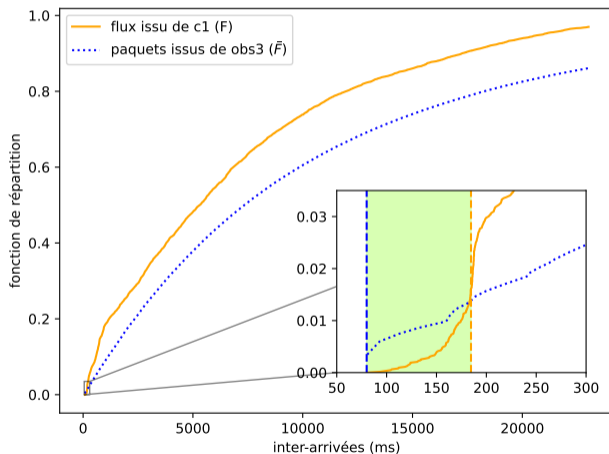
$$P(\Delta t \in B | \text{intra-agrégat})$$

<

$$P(\Delta t \in B | \text{inter-agrégat})$$



Test accepté de présence d'une file commune

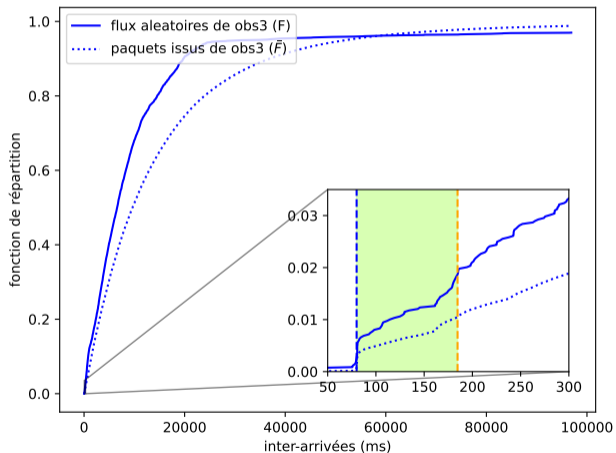


Comparaison entre les distributions des inter-flux de :

- un agrégat de 7 flux issus de **c1**
- un ensemble équivalent de paquets aléatoires

$$\bar{F}(t_s) > F(t_s)$$

Test rejeté de présence d'une file commune



Comparaison entre les distributions des inter-flux de :

- un ensemble de 7 flux aléatoires
- un ensemble équivalent de paquets aléatoires

$$\bar{F}(t_s) < F(t_s)$$

Plan

- 1 Mise en place d'un nouvel algorithme
- 2 Analyse réseau : établir un test de présence de file d'attente
- 3 Inférence de topologie par partitionnement de graphe**
- 4 Partitionnement robuste par modèle de graphe
- 5 Conclusion

Partitionnement de graphe

Le problème de partitionnement est difficile

Le nombre de combinaisons de flux est exponentiel, il est impossible de toutes les tester.

Proposition : représenter le problème dans un graphe

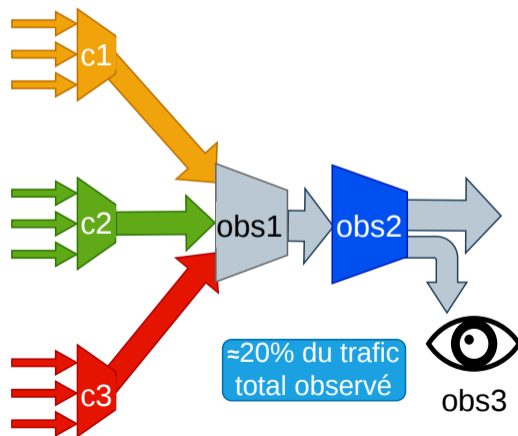
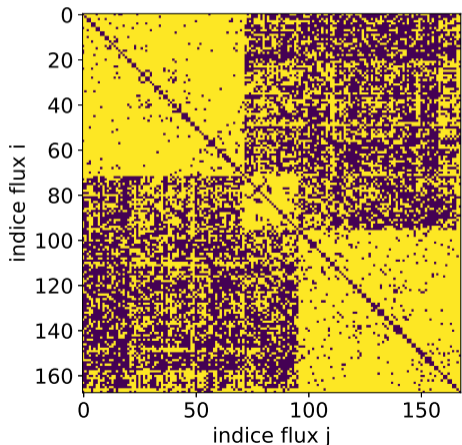
Dans le réseau	un flux de paquets	un test H de présence de file d'attente
Dans le graphe	un nœud	un lien

Le graphe linéarise le problème. Pour 3 flux $\{a, b, c\}$, on suppose que :

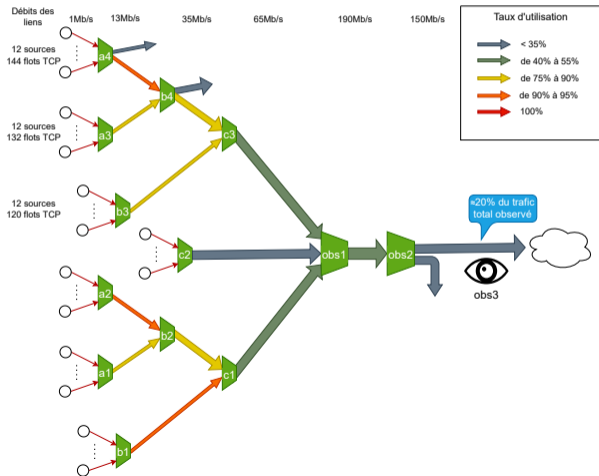
$$H(a, \{b, c\}) = \frac{1}{2}H(a, b) + \frac{1}{2}H(a, c)$$

Matrice résultat des tests de présence de flux

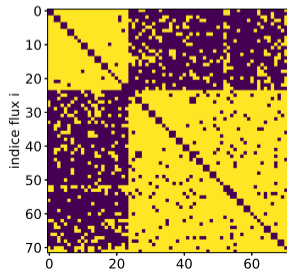
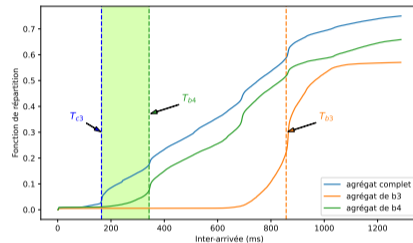
Matrice des résultats de test de présence de file commune pour chaque paire de flux (i, j) - résolue avec l'algorithme de partitionnement spectral.



Inférence sur le réseau complet



Application à c3



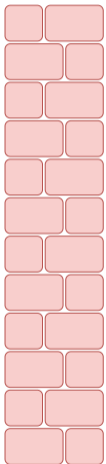
Résultat

Dans le scénario présenté, l'algorithme identifie la présence de files d'attente et classe correctement les flux.

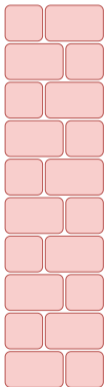
Points d'attention :

- Pour détecter toutes les files d'attente → Choix d'un coefficient de lissage de la fonction de répartition adapté à son taux de saturation.
- Pour correctement classer chaque flux → Capture d'une quantité suffisante de paquets.

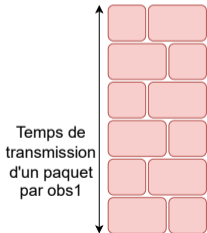
Condition d'observabilité du réseau



b3



c3



obs1

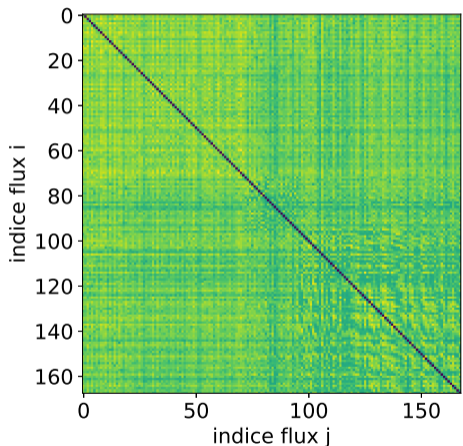


obs2

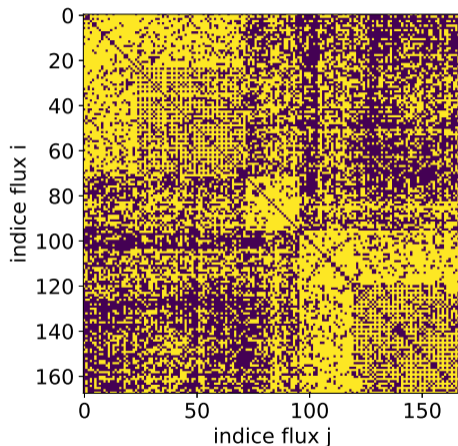


obs3

Comparaison avec la méthode par entropie en obs3

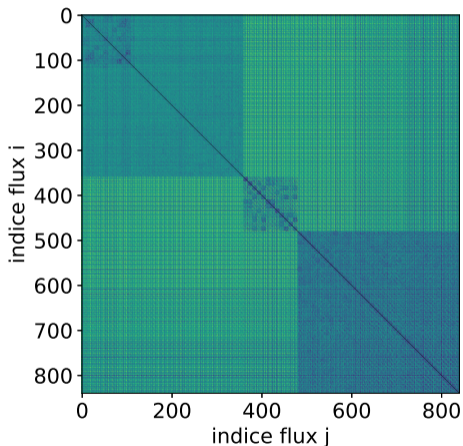


Matrice d'entropie des paires de flux

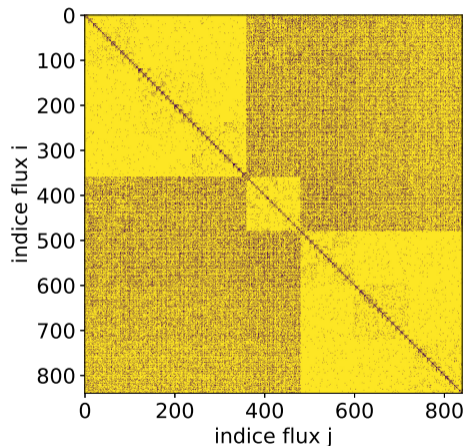


Matrice des tests de présence de file

Comparaison avec la méthode par entropie en obs1



Matrice d'entropie des paires de flux



Matrice des tests de présence de file

Plan

- 1 Mise en place d'un nouvel algorithme
- 2 Analyse réseau : établir un test de présence de file d'attente
- 3 Inférence de topologie par partitionnement de graphe
- 4 Partitionnement robuste par modèle de graphe
- 5 Conclusion

Définitions

Algorithme de partitionnement de graphe

Un algorithme de partitionnement de graphe est défini par

- une **méthode de partitionnement** (*agrégation, divisions successives, parcours aléatoire*)
- un **score non supervisé** (*modularité, vraisemblance d'un modèle, coupe minimale*)

Modèle de graphe

Un modèle de graphe génère un graphe aléatoire à partir :

- d'une partition
- de lois de probabilité de présence d'arêtes

Existe-t-il une équivalence entre un score et un modèle de graphe ?

Mesure de performance du partitionnement

Dans la littérature, les algorithmes sont comparés avec :

- ① un **scénario de test** accepté par la communauté : *club de Karate*, *personnages de Victor Hugo*...
- ① un **score supervisé** : *silhouette*, *information mutuelle*, *Adjusted Rand Index*...

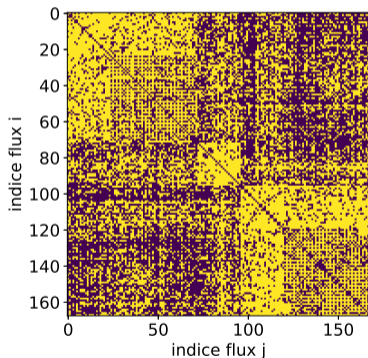
Comment estimer la qualité d'une partition ?

- ① Choix d'un modèle de graphe pertinent.
- ① Estimation des paramètres du modèle.
- ① Mesurer la performance de l'algorithme sur le modèle paramétré.

Notations

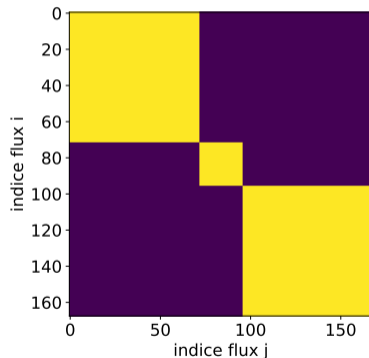
Soient $(0, \dots, i, j, \dots, n)$ les indices des flux observés, associés à des nœuds du graphe.

Matrice observée $A = (a_{ij})$



partitionnement
→

Vérité terrain $V = (v_{ij})$



←
modèle de graphe

On note $(C_1 \dots C_K)$ la partition attendue (vérité terrain) telle que :

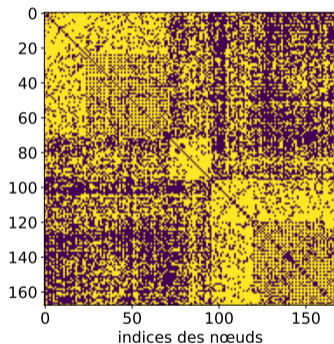
$$v_{ij} = 1 \Leftrightarrow \exists k, (i, j) \in C_k \times C_k$$

Choix du modèle de graphe

Modèle par blocs (SBM)	Planted model	Modèle par nœuds
<i>Paramètres</i>		
$\frac{K(K+1)}{2}$ paramètres, dépend du nombre de classes K : $C = (c_{kl})_{1 \leq k, l \leq K}$	2 paramètres (p, q)	2n paramètres : $(p_1 \dots p_n), (q_1 \dots q_n)$
<i>Équations</i>		
$P(a_{ij} = 1 (i, j) \in C_k \times C_l) = c_{kl}$	$P(a_{ij} = 1 v_{ij} = 1) = p$ $P(a_{ij} = 1 v_{ij} = 0) = q$	$P(a_{ij} = 1 v_{ij} = 1) = \frac{p_i + p_j}{2}$ $P(a_{ij} = 1 v_{ij} = 0) = \frac{q_i + q_j}{2}$
<i>Contraintes</i>		
non spécifié	$p > q$	$\forall i, p_i > q_i$

Évaluation de qualité du partitionnement

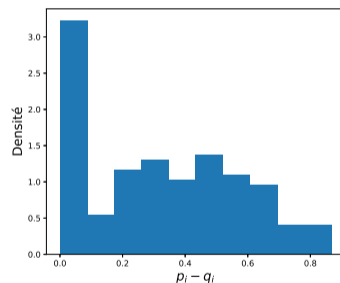
Données réseau émulées



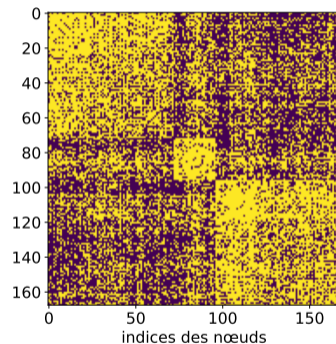
Estimations des paramètres

$$L_{\text{planted model}} = -18e3;$$

$$L_{\text{modele nœuds}} = -17e3.$$



Simulation de 40 matrices



Résultats pour ce
jeu de données :

	spectral clustering	modularité	vraisemblance
ARI $\pm 2\sigma$	0,94 \pm 0,06	0,94 \pm 0,06	0,98 \pm 0,03

Plan

- 1 Mise en place d'un nouvel algorithme
- 2 Analyse réseau : établir un test de présence de file d'attente
- 3 Inférence de topologie par partitionnement de graphe
- 4 Partitionnement robuste par modèle de graphe
- 5 Conclusion

Contributions

Un algorithme d'inférence de topologie

Deux flux parcourent un chemin commun d'autant plus long que leurs inter-flux sont grands.

Un nouveau modèle de graphe

Plus précis grâce à ses nombreux paramètres.

Limites de l'algorithme

- Fonctionne dans un sens uniquement, celui de l'écoulement des paquets,
- Nécessite une position centrale,
- Le compromis précision/taille de la capture/quantité de calculs est à définir

Perspectives

Réseau

- Test sur des données réelles
- Détection d'anomalies réseau par analyse d'agrégats

Partitionnement

- Modèle semi-supervisé : relier débit du flux i et paramètres (p_i, q_i) .
- Approfondir l'équivalence score-modèle
- Comment aborder le problème de la très grande dimension ?

Merci pour votre attention

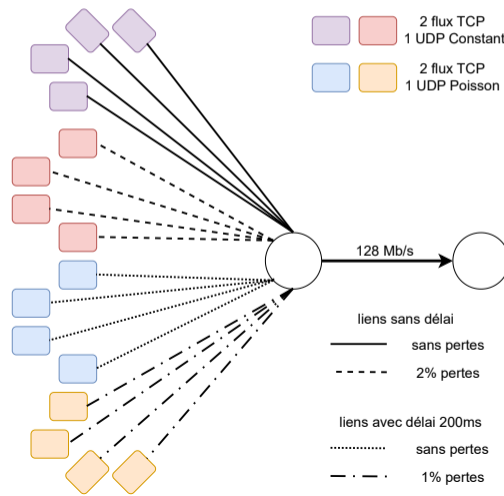
Comment détecter la présence d'anomalies dans un flux de paquets chiffrés ?

Génération de données

Émulation du réseau
ci-contre.

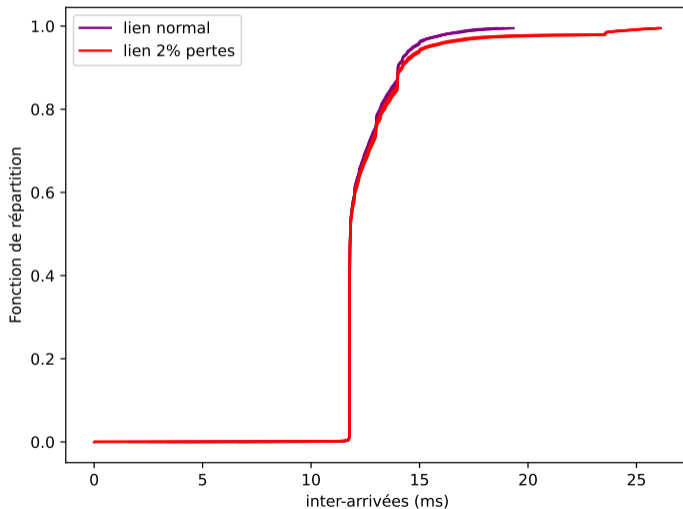
Données analysées

La distribution des
inter-arrivées, différences
des instants d'arrivées
entre deux paquets
successifs.



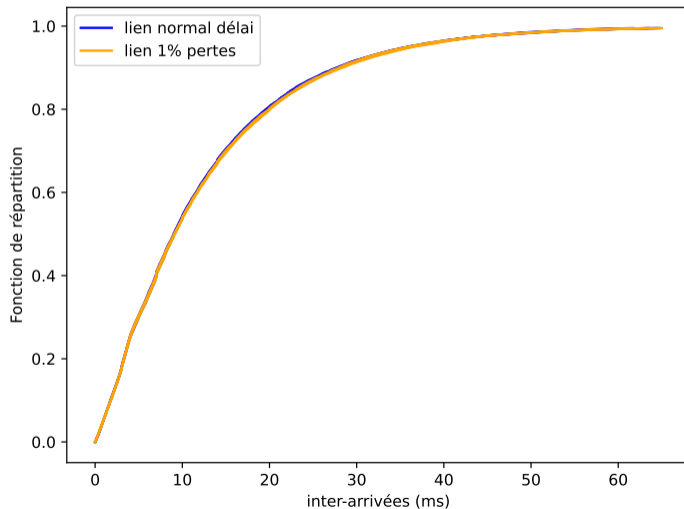
Cas des flux UDP Constant Bit Rate

Les pertes sont détectables si la gigue introduite par la file n'est pas trop élevée.



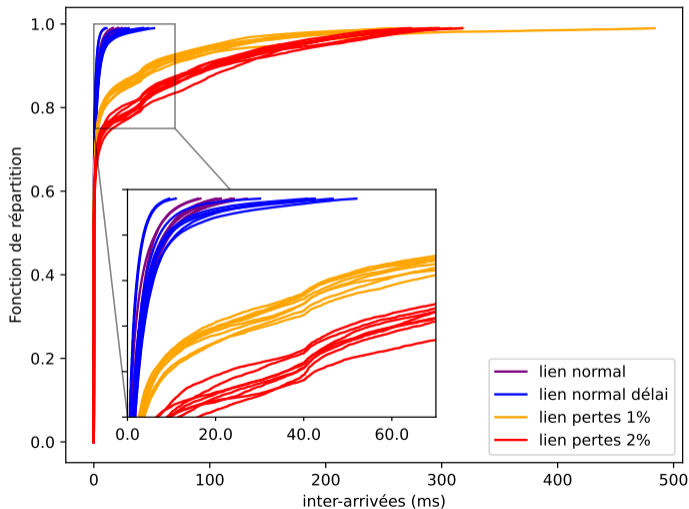
Cas de flux UDP Variable Bit Rate

Seule la connaissance
du débit entrant
permet de détecter
les pertes.



Flux TCP traversant le goulot

La distribution des inter-arrivées varie différemment selon le type de paramètre d'expérience : délai, pertes, débit maximal
...



Que peuvent les méthodes d'IA ?

Techniques d'apprentissage supervisées

Apprentissage d'hyperplans séparant les classes de flux selon les critères perçus par les utilisateurs. Exemples de méthodes :

- Machine Learning : SVM, Random Forest
- Deep learning : CNN, LSTM

Limites de l'analyse par flux

- Le comportement d'un utilisateur n'est pas stable.
- Les séries temporelles sont de taille variable.
- Les caractéristiques statistiques standards ne suffisent pas.
- Pertinence de l'étude des variations temporelles ?

Méthodes du minimum et du mode principal⁴

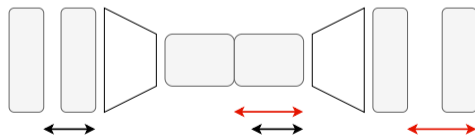
Description

Méthode active par injection de flux à haut débit pour mesurer le débit du lien le plus faible (ici nommé goulot).

Deux techniques sont proposées pour détecter le goulot :

- ① l'inter-arrivée minimale
- ① le mode principale de la distribution des inter-arrivées

Espacement d'une paire de paquets



4. R Carter, M Crovella *Measuring bottleneck link speed in packet-switched networks*, 1996

Méthode par entropie

Description

Méthode passive de regroupement des flux selon la file d'attente la plus congestionnée (goulot), par analyse des inter-espacements des agrégats de flux.

Katabi trouve le partitionnement de flux en agrégat qui minimise l'entropie totale :

$$\sum_n K_q(\text{agrégat } n)$$

L'entropie généralisée de Rènyi est définie à partir de la densité f des inter-arrivées d'un agrégat de flux :

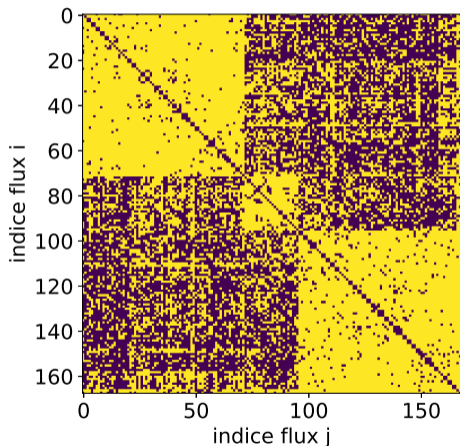
$$K_q = \frac{1}{1-q} \log_2 \left(\int_I f(x)^q dx \right)$$

Partitionnement des flux par méthode spectrale

Partitionnement en itérant sur le nombre de classes. Pour chaque nombre :

- ① projection spectrale
- ① résolution avec K-means
- ① mesure de pertinence du résultat par la modularité

Projection spectrale de l'agrégat total en obs3



Matrice d'adjacence des flux

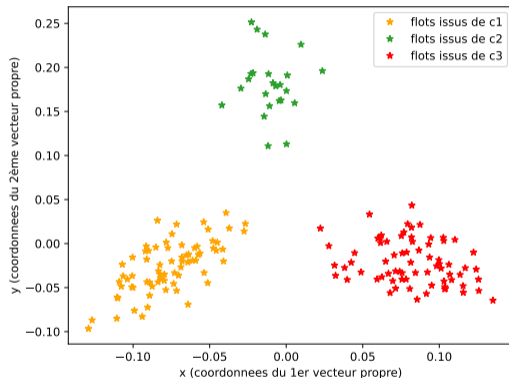
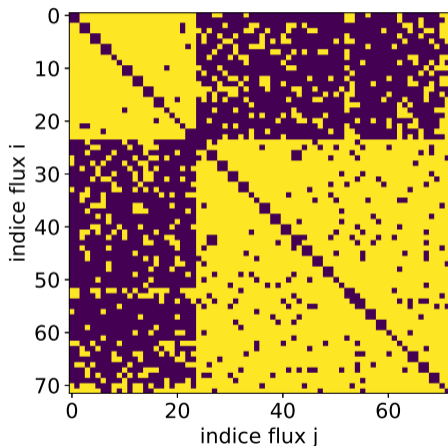


Illustration de projection spectrale
(3 clusters, 2 vecteurs propres)

Projection spectrale de l'agrégat issu de c3 observé en obs3



Matrice d'adjacence des flux

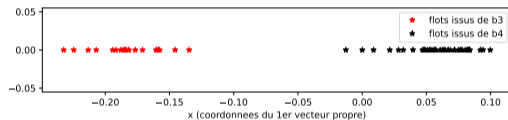


Illustration de projection spectrale
(2 clusters, 1 vecteur propre)

Quelques ordres de grandeur (alt. 500km)

12 min de temps de survol d'une station sol (vis. min. 25°)

7600 m/s la vitesse du satellite

12ms de temps de transmission (paquet de 1500o à 1Gb/s)

Le satellite a bougé de 9cm, gigue introduite : 3×10^{-10} s

Dernières avancées de l'algorithme

Validation d'un résultat de partitionnement

Le partitionnement est validé si, pour tout sous-agrégat

$$F_{\text{sous-agregat}}(t_s) < 0,2$$

- Si le partitionnement est invalide, nouvelle tentative de partition de l'agrégat avec une nouvelle valeur de t_s .
- Si le partitionnement est validé, on continue sur chaque sous-agrégat.

Recherche du seuil t_s suivant

La valeur renvoyée est cherchée dans l'intervalle $]t_{s,\text{precedent}}, \infty)$. Elle correspond à l'abscisse du prochain saut significatif de la fonction de répartition de l'agrégat complet.