Guide des Opérations OmniUPF

Table des Matières

Aperçu

OmniUPF (Fonction de Plan Utilisateur basée sur eBPF) est une fonction de plan utilisateur 5G/LTE haute performance qui fournit un transfert de paquets de qualité opérateur, une application de la qualité de service (QoS) et une gestion du trafic pour les réseaux mobiles. Basé sur la technologie eBPF (Extended Berkeley Packet Filter) de Linux et amélioré avec des capacités de gestion complètes, OmniUPF fournit l'infrastructure de traitement de paquets essentielle requise pour les réseaux 5G SA, 5G NSA et LTE.

Qu'est-ce qu'une Fonction de Plan Utilisateur ?

La Fonction de Plan Utilisateur (UPF) est l'élément de réseau standardisé par 3GPP responsable du traitement et du transfert de paquets dans les réseaux 5G et LTE. Elle fournit :

- **Transfert de paquets à haute vitesse** entre les appareils mobiles et les réseaux de données
- **Application de la Qualité de Service (QoS)** pour différents types de trafic
- **Détection et routage du trafic** basés sur des filtres et des règles de paquets
- **Rapports d'utilisation** pour la facturation et l'analyse
- **Mise en mémoire tampon des paquets** pour les scénarios de gestion de mobilité et de session
- **Support d'interception légale** pour la conformité réglementaire

OmniUPF implémente l'ensemble des fonctionnalités UPF définies dans 3GPP TS 23.501 (5G) et TS 23.401 (LTE), fournissant une solution de plan utilisateur complète et prête pour la production utilisant la technologie eBPF du noyau Linux pour des performances maximales.

Capacités Clés d'OmniUPF

Traitement des Paquets :

- Traitement complet des paquets de plan utilisateur conforme à 3GPP
- Chemin de données basé sur eBPF pour des performances au niveau du noyau
- Encapsulation et décapsulation GTP-U (GPRS Tunneling Protocol)
- Support IPv4 et IPv6 pour les réseaux d'accès et de données
- XDP (eXpress Data Path) pour un traitement à latence ultra-faible
- Traitement des paquets multi-threadé

QoS et Gestion du Trafic :

- Règles d'application de la QoS (QER) pour la gestion de la bande passante
- Règles de détection de paquets (PDR) pour la classification du trafic
- Règles d'action de transfert (FAR) pour les décisions de routage
- Filtrage de flux de données de service (SDF) pour le routage spécifique aux applications

- Règles de rapport d'utilisation (URR) pour le suivi des volumes et la facturation

Contrôle et Gestion :

- Interface PFCP (Packet Forwarding Control Protocol) vers SMF/PGW-C
- API RESTful pour la surveillance et le diagnostic
- Statistiques et métriques en temps réel
- Surveillance de la capacité des cartes eBPF
- Panneau de contrôle basé sur le web

Fonctionnalités de Performance :

- Traitement de paquets sans copie via eBPF
- Transfert de paquets au niveau du noyau (sans surcharge d'espace utilisateur)
- Scalabilité multi-cœurs
- Capable de décharger pour l'accélération matérielle
- Optimisé pour les déploiements cloud-natifs

Pour des détails sur l'utilisation du panneau de contrôle, voir Opérations de l'Interface Web.

Comprendre l'Architecture du Plan Utilisateur

OmniUPF est une solution de plan utilisateur unifiée fournissant un transfert de paquets de qualité opérateur pour les réseaux 5G Standalone (SA), 5G NSA et 4G LTE/EPC. **OmniUPF est un produit unique** qui peut simultanément fonctionner comme :

- **UPF (Fonction de Plan Utilisateur)** - plan utilisateur 5G/NSA (contrôlé par OmniSMF via N4/PFCP)
- **PGW-U (PDN Gateway User Plane)** - passerelle 4G EPC vers des réseaux externes (contrôlé par OmniPGW-C via Sxc/PFCP)

- **SGW-U (Serving Gateway User Plane)** - passerelle de service 4G EPC (contrôlé par OmniSGW-C via Sxb/PFCP)

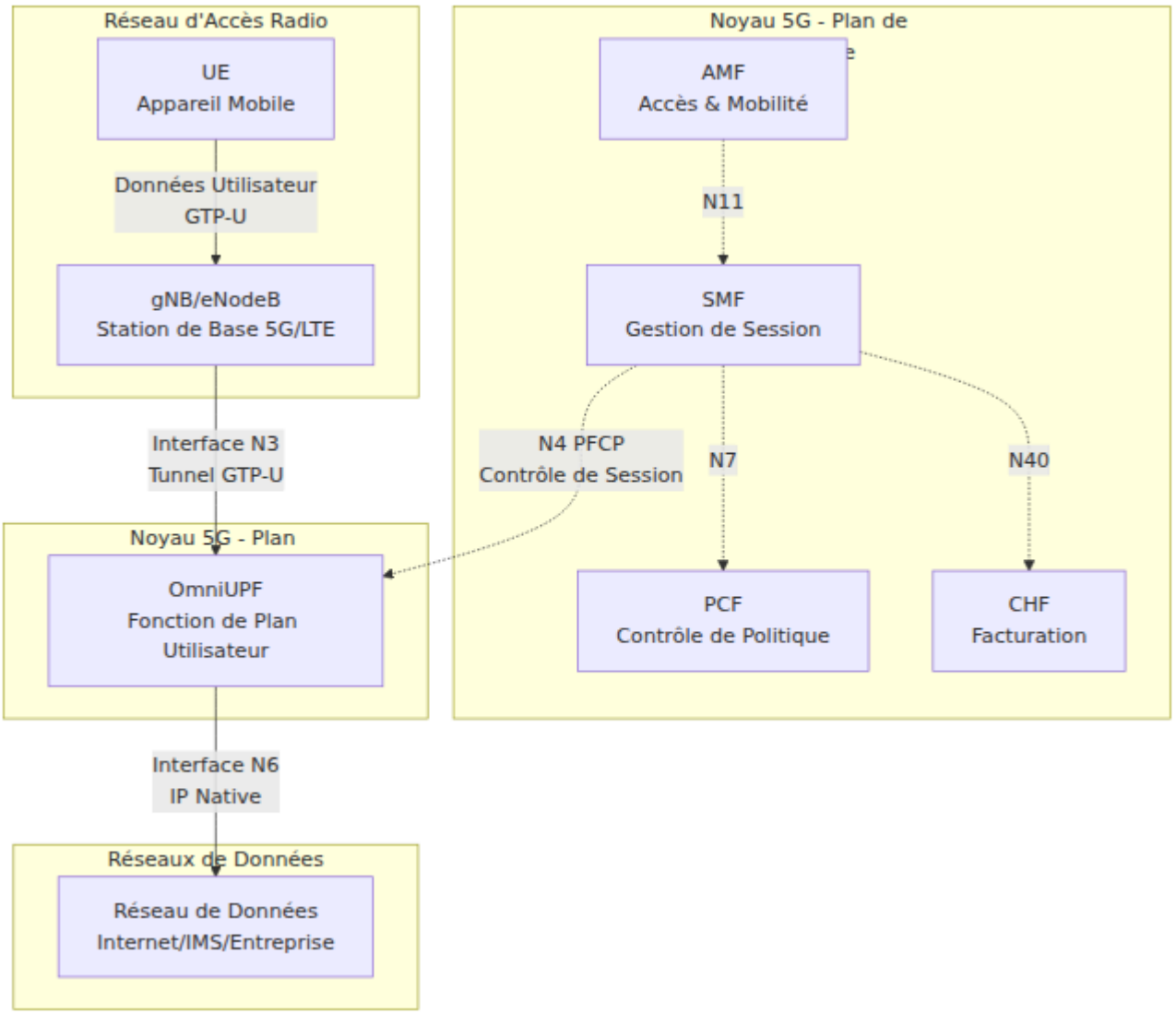
OmniUPF peut fonctionner dans **n'importe quelle combinaison** de ces modes :

- **UPF uniquement** : Déploiement pur 5G
- **PGW-U + SGW-U** : Passerelle 4G combinée (déploiement EPC typique)
- **UPF + PGW-U + SGW-U** : Support simultané 4G et 5G (scénario de migration)

Tous les modes utilisent le même moteur de traitement de paquets basé sur eBPF et le protocole PFCP, offrant des performances élevées constantes qu'il fonctionne comme UPF, PGW-U, SGW-U, ou les trois simultanément.

Architecture du Réseau 5G (Mode SA)

La solution OmniUPF se situe au niveau du plan de données des réseaux 5G, fournissant la couche de transfert de paquets à haute vitesse qui connecte les appareils mobiles aux réseaux et services de données.



Architecture du Réseau 4G LTE/EPC

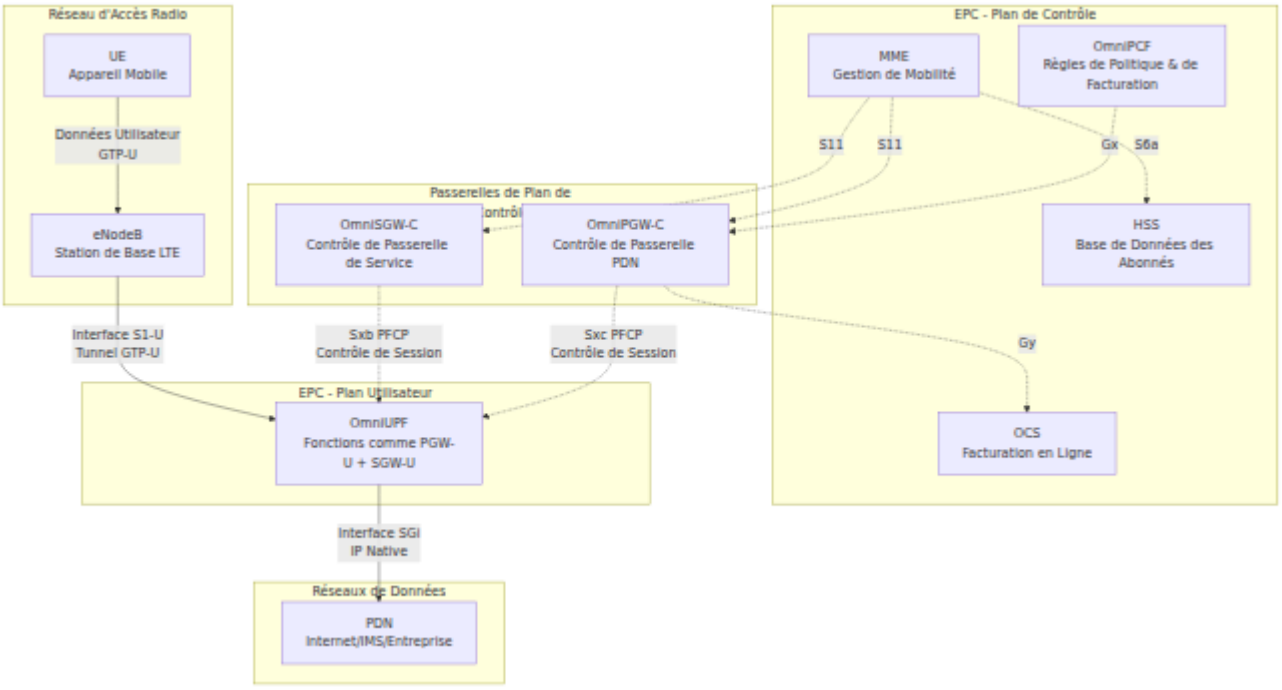
OmniUPF prend également en charge les déploiements 4G LTE et EPC (Evolved Packet Core), fonctionnant soit comme OmniPGW-U soit comme OmniSGW-U en fonction de l'architecture du réseau.

Mode PGW-U/SGW-U Combiné (Déploiement 4G Typique)

Dans ce mode, OmniUPF agit à la fois comme SGW-U et PGW-U, contrôlé par des fonctions de plan de contrôle distinctes.

Mode SGW-U et PGW-U Séparés (Roaming/Multi-Site)

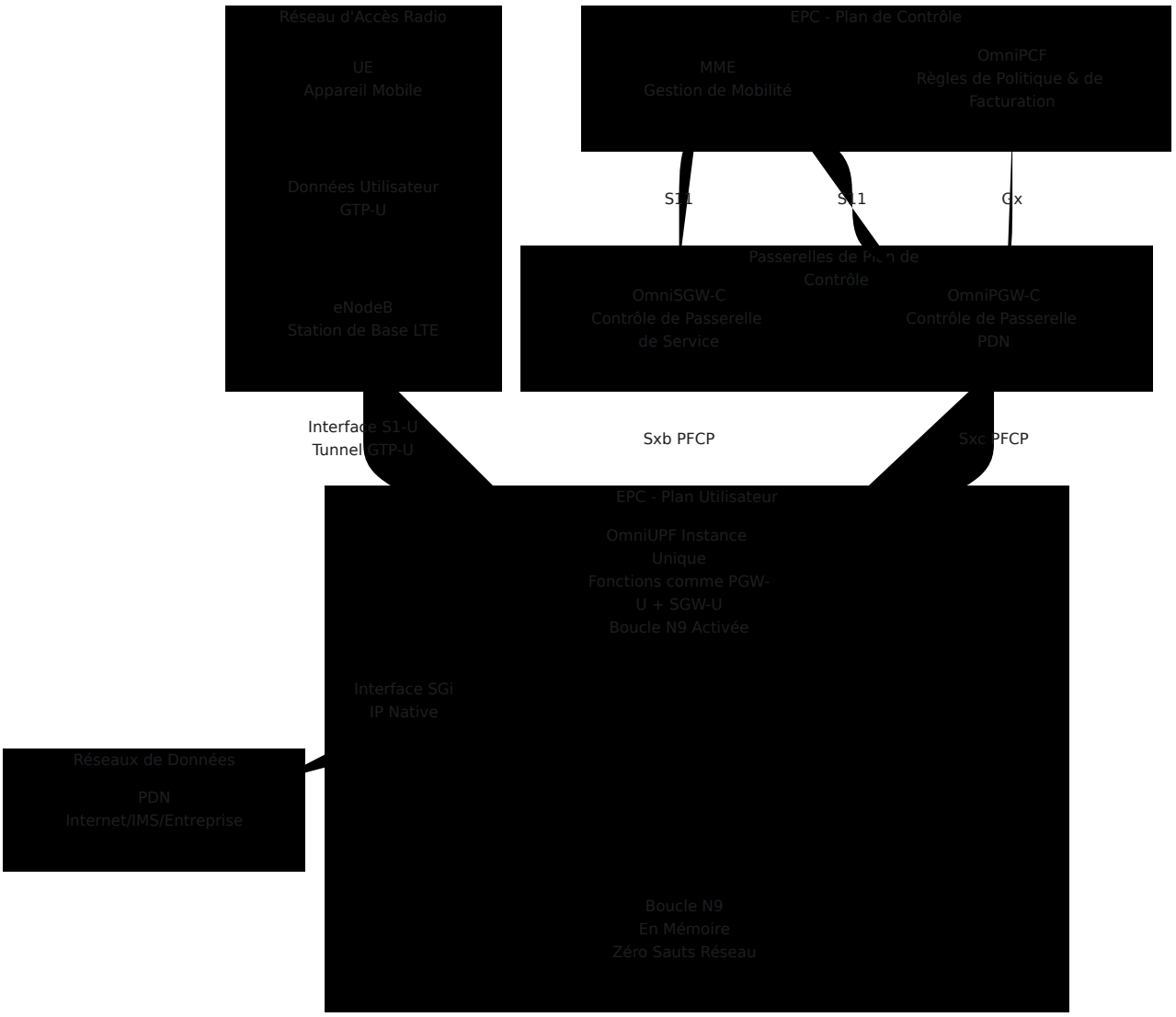
Dans les déploiements de roaming ou multi-site, deux instances OmniUPF distinctes peuvent être déployées - une comme SGW-U et une comme PGW-U.



Mode Boucle N9 (Instance Unique SGWU+PGWU)

Pour des déploiements simplifiés, OmniUPF peut exécuter **à la fois les rôles SGWU et PGWU sur une seule instance** avec un traitement de boucle N9

entièrement en eBPF.



Caractéristiques Clés :

- **Latence N9 sub-microseconde** - Traitée entièrement en eBPF, ne touche jamais le réseau
- **Réduction CPU de 40-50%** - Un seul passage XDP contre deux instances séparées
- **Déploiement simplifié** - Une instance, un fichier de configuration
- **Détection automatique** - Lorsque `n3_address` = `n9_address`, la boucle est activée
- **Conformité complète 3GPP** - Protocoles PFCP et GTP-U standard

Configuration :

```
# /etc/omniupf/runtime.exs
xdp_interfaces = "eth0"
n3_address = "10.0.1.10"        # IP de l'interface S1-U
n9_address = n3_address          # La même IP active la boucle N9
pfcp_address = "10.0.1.10"      # Les deux SGWU-C et PGWU-C se
connectent ici
pfcp_port = 8805
```

Quand l'utiliser :

- Déploiements de calcul en périphérie (minimiser la latence)
- Environnements à coûts contraints (serveur unique)
- Laboratoire/test (configuration simplifiée)
- Déploiements petits à moyens (< 100K abonnés)

Quand NE PAS utiliser :

- Redondance géographique requise (SGWU et PGWU dans des emplacements différents)
- Mandats réglementaires pour des passerelles séparées
- Échelle massive (> 1M abonnés)

Pour des détails complets, des exemples de configuration, du dépannage et des métriques de performance, voir **Guide des Opérations de Boucle N9**.

Comment Fonctionnent les Fonctions de Plan Utilisateur dans le Réseau

La fonction de plan utilisateur (OmniUPF, OmniPGW-U ou OmniSGW-U) fonctionne comme le plan de transfert contrôlé par le plan de contrôle respectif :

1. **Établissement de Session**
    - **5G** : OmniSMF établit l'association PFCP via l'interface N4 avec OmniUPF

- **4G** : OmniPGW-C ou OmniSGW-C établit l'association PFCP via Sxb/Sxc avec OmniPGW-U/OmniSGW-U
- Le plan de contrôle crée des sessions PFCP pour chaque session PDU UE (5G) ou contexte PDP (4G)
- Le plan utilisateur reçoit des règles PDR, FAR, QER et URR via PFCP
- Les cartes eBPF sont peuplées avec des règles de transfert

2. **Traitement des Paquets Montants** (UE → Réseau de Données)

- **5G** : Les paquets arrivent sur l'interface N3 depuis gNB avec encapsulation GTP-U
- **4G** : Les paquets arrivent sur l'interface S1-U (SGW-U) ou S5/S8 (PGW-U) depuis eNodeB avec encapsulation GTP-U
- Le plan utilisateur fait correspondre les paquets aux PDRs montants basés sur TEID
- Le programme eBPF applique QER (limitation de débit, marquage)
- FAR détermine l'action de transfert (transférer, supprimer, mettre en mémoire tampon, dupliquer)
- Tunnel GTP-U retiré, paquets transférés à l'interface N6 (5G) ou SGi (4G)
- URR suit les comptes de paquets et d'octets pour la facturation

3. **Traitement des Paquets Descendants** (Réseau de Données → UE)

- **5G** : Les paquets arrivent sur l'interface N6 sous forme d'IP native
- **4G** : Les paquets arrivent sur l'interface SGi sous forme d'IP native
- Le plan utilisateur fait correspondre les paquets aux PDRs descendants basés sur l'adresse IP de l'UE
- Les filtres SDF peuvent classifier davantage le trafic par port, protocole ou application
- FAR détermine le tunnel GTP-U et les paramètres de transfert
- L'encapsulation GTP-U est ajoutée avec le TEID approprié
- **5G** : Les paquets sont transférés à l'interface N3 vers gNB
- **4G** : Les paquets sont transférés à S1-U (SGW-U) ou S5/S8 (PGW-U) vers eNodeB

4. **Mobilité et Transfert**

- **5G** : OmniSMF met à jour les règles PDR/FAR lors des scénarios de transfert
- **4G** : OmniSGW-C/OmniPGW-C met à jour les règles lors du transfert inter-eNodeB ou TAU (Mise à Jour de Zone de Suivi)
- Le plan utilisateur peut mettre en mémoire tampon les paquets lors du changement de chemin
- Transition transparente entre les stations de base sans perte de paquets

Intégration avec le Plan de Contrôle (4G et 5G)

OmniUPF s'intègre avec les fonctions de plan de contrôle 5G et 4G via des interfaces 3GPP standard :

Interfaces 5G

Interface	De → À	Objectif	Spécification 3GPP
N4	OmniSMF ↔ OmniUPF	Établissement, modification, suppression de session PFCP	TS 29.244
N3	gNB → OmniUPF	Trafic de plan utilisateur depuis RAN (GTP-U)	TS 29.281
N6	OmniUPF → Réseau de Données	Trafic de plan utilisateur vers DN (IP native)	TS 23.501
N9	OmniUPF ↔ OmniUPF	Communication inter-UPF pour roaming/périphérie	TS 23.501

Interfaces 4G/EPC

Interface	De → À	Objectif	Spécification 3GPP
Sxb	OmniSGW-C ↔ OmniUPF (mode SGW-U)	Contrôle de session PFCP pour la passerelle de service	TS 29.244
Sxc	OmniPGW-C ↔ OmniUPF (mode PGW-U)	Contrôle de session PFCP pour la passerelle PDN	TS 29.244
S1-U	eNodeB → OmniUPF (mode SGW-U)	Trafic de plan utilisateur depuis RAN (GTP-U)	TS 29.281
S5/S8	OmniUPF (SGW-U) ↔ OmniUPF (PGW-U)	Plan utilisateur inter-passerelle (GTP-U)	TS 29.281
SGi	OmniUPF (mode PGW-U) → PDN	Trafic de plan utilisateur vers le réseau de données (IP native)	TS 23.401

Remarque : Toutes les interfaces PFCP (N4, Sxb, Sxc) utilisent le même protocole PFCP défini dans TS 29.244. Les noms d'interface diffèrent mais le protocole et les formats de message sont identiques.

Composants du UPF

Chemin de Données eBPF

Le **chemin de données eBPF** est le moteur de traitement de paquets central qui fonctionne dans le noyau Linux pour des performances maximales.

Fonctions Principales :

- **Traitement GTP-U** : Encapsulation et décapsulation des tunnels GTP-U
- **Classification des Paquets** : Correspondance des paquets avec les règles PDR en utilisant TEID, IP de l'UE ou filtres SDF
- **Application de la QoS** : Appliquer la limitation de débit et le marquage des paquets selon les règles QER
- **Décisions de Transfert** : Exécuter les actions FAR (transférer, supprimer, mettre en mémoire tampon, dupliquer, notifier)
- **Suivi d'Utilisation** : Incrémenter les compteurs URR pour la facturation basée sur le volume

Cartes eBPF : Le chemin de données utilise des cartes eBPF (tables de hachage dans la mémoire du noyau) pour le stockage des règles :

Nom de la Carte	Objectif	Clé	Valeur
`uplink_pdr_map`	PDRs montants	TEID (32 bits)	Infos PDR (ID FAR, ID QER, IDs URR)
`downlink_pdr_map`	PDRs descendants (IPv4)	Adresse IP de l'UE	Infos PDR
`downlink_pdr_map_ip6`	PDRs descendants (IPv6)	Adresse IPv6 de l'UE	Infos PDR
`far_map`	Règles de transfert	ID FAR	Paramètres de transfert (action, infos de tunnel)
`qer_map`	Règles de QoS	ID QER	Paramètres de QoS (MBR, GBR, marquage)
`urr_map`	Suivi d'utilisation	ID URR	Compteurs de volume (montant, descendant, total)
`sdf_filter_map`	Filtres SDF	ID PDR	Filtres d'application (ports, protocoles)

Caractéristiques de Performance :

- **Zéro-copie** : Paquets traités entièrement dans l'espace du noyau
- **Support XDP** : Attacher au niveau du pilote réseau pour une latence sub-microseconde
- **Multi-cœur** : Se développe sur les cœurs CPU avec un support de carte par CPU

- **Capacité** : Millions de PDRs/FARs dans les cartes eBPF (limité par la mémoire du noyau)

Pour la surveillance de la capacité, voir Gestion de Capacité.

Gestionnaire d'Interface PFCP

L'**interface PFCP** implémente 3GPP TS 29.244 pour la communication avec SMF ou PGW-C.

Fonctions Principales :

- **Gestion d'Association** : Cœur de PFCP et configuration de l'association
- **Cycle de Vie de Session** : Créer, modifier et supprimer des sessions PFCP
- **Installation de Règles** : Traduire les IE PFCP en entrées de carte eBPF
- **Rapports d'Événements** : Notifier SMF des seuils d'utilisation, des erreurs ou des événements de session

Support de Message PFCP :

Type de Message	Direction	Objectif
Établissement d'Association	SMF → UPF	Établir l'association de contrôle PFCP
Libération d'Association	SMF → UPF	Détruire l'association PFCP
Cœur de Vie	Bidirectionnel	Maintenir l'association active
Établissement de Session	SMF → UPF	Créer une nouvelle session PDU avec PDR/FAR/QER/URR
Modification de Session	SMF → UPF	Mettre à jour les règles pour la mobilité, les changements de QoS
Suppression de Session	SMF → UPF	Supprimer la session et toutes les règles associées
Rapport de Session	UPF → SMF	Rapporter l'utilisation, les erreurs ou les événements

Éléments d'Information (IE) Supportés :

- Créer PDR, FAR, QER, URR
- Mettre à jour PDR, FAR, QER, URR
- Supprimer PDR, FAR, QER, URR
- Informations de Détection de Paquet (IP de l'UE, F-TEID, filtre SDF)
- Paramètres de Transfert (instance réseau, création d'en-tête externe)
- Paramètres de QoS (MBR, GBR, QFI)
- Déclencheurs de Rapport d'Utilisation (seuil de volume, seuil de temps)

Serveur API REST

L'**API REST** fournit un accès programmatique à l'état et aux opérations du UPF.

Fonctions Principales :

- **Surveillance de Session** : Interroger les sessions PFCP actives et les associations
- **Inspection des Règles** : Voir les configurations PDR, FAR, QER, URR
- **Statistiques** : Récupérer les compteurs de paquets, les statistiques de route, les statistiques XDP
- **Gestion des Tampons** : Voir et contrôler les tampons de paquets
- **Informations sur les Cartes** : Surveiller l'utilisation et la capacité des cartes eBPF

Points de Terminaison API : (34 points de terminaison au total)

Catégorie	Points de Terminaison	Description
Santé	`/health`	Vérification de santé et état
Configuration	`/config`	Configuration du UPF
Sessions	`/pfcp_sessions`, `/pfcp_associations`	Données de session/association PFCP
PDRs	`/uplink_pdr_map`, `/downlink_pdr_map`, `/downlink_pdr_map_ip6`, `/uplink_pdr_map_ip6`	Règles de détection de paquets
FARs	`/far_map`	Règles d'action de transfert
QERs	`/qer_map`	Règles d'application de la QoS
URRs	`/urr_map`	Règles de rapport d'utilisation
Tampons	`/buffer`	État et contrôle des tampons de paquets
Statistiques	`/packet_stats`, `/route_stats`, `/xdp_stats`, `/n3n6_stats`	Métriques de performance
Capacité	`/map_info`	Capacité et utilisation des cartes eBPF
Dataplane	`/dataplane_config`	Adresses des interfaces N3/N9

Pour des détails sur l'API et son utilisation, voir **Guide de Surveillance**.

Panneau de Contrôle Web

Le **Panneau de Contrôle Web** fournit un tableau de bord en temps réel pour la surveillance et la gestion du UPF.

Fonctionnalités :

- **Vue des Sessions** : Parcourir les sessions PFCP actives avec IP UE, TEID et compte de règles
- **Gestion des Règles** : Voir et gérer les PDRs, FARs, QERs et URRs à travers toutes les sessions
- **Surveillance des Tampons** : Suivre les paquets mis en mémoire tampon et contrôler la mise en mémoire tampon par FAR
- **Tableau de Bord Statistique** : Statistiques en temps réel sur les paquets, les routes, XDP et les statistiques des interfaces N3/N6
- **Surveillance de la Capacité** : Utilisation des cartes eBPF avec des indicateurs de capacité codés par couleur
- **Vue de Configuration** : Afficher la configuration du UPF et les adresses du dataplane
- **Visionneuse de Journaux** : Diffusion en direct des journaux pour le dépannage

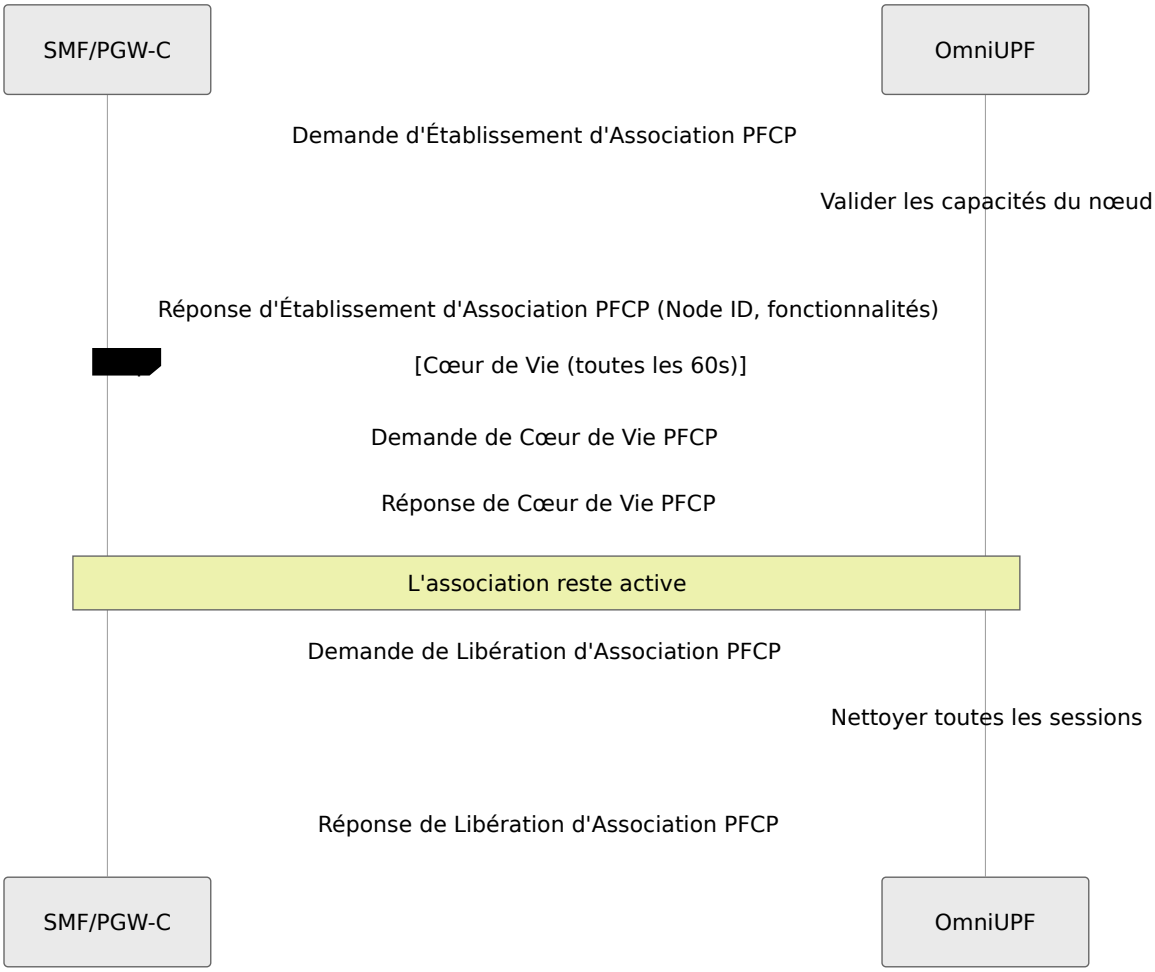
Pour des opérations détaillées de l'interface utilisateur, voir **Guide des Opérations de l'Interface Web**.

Protocole PFCP et Intégration SMF

Association PFCP

Avant que des sessions puissent être créées, le SMF doit établir une association PFCP avec le UPF.

Cycle de Vie de l'Association :



Points Clés :

- Chaque SMF établit une association avec le UPF
- UPF suit l'association par Node ID (FQDN ou adresse IP)
- Les messages de cœur de vie maintiennent la vivacité de l'association
- Toutes les sessions sous une association sont supprimées si l'association est libérée

Pour voir les associations, voir Vue des Sessions.

Détection de Redémarrage SMF et Nettoyage des Sessions Orphelines

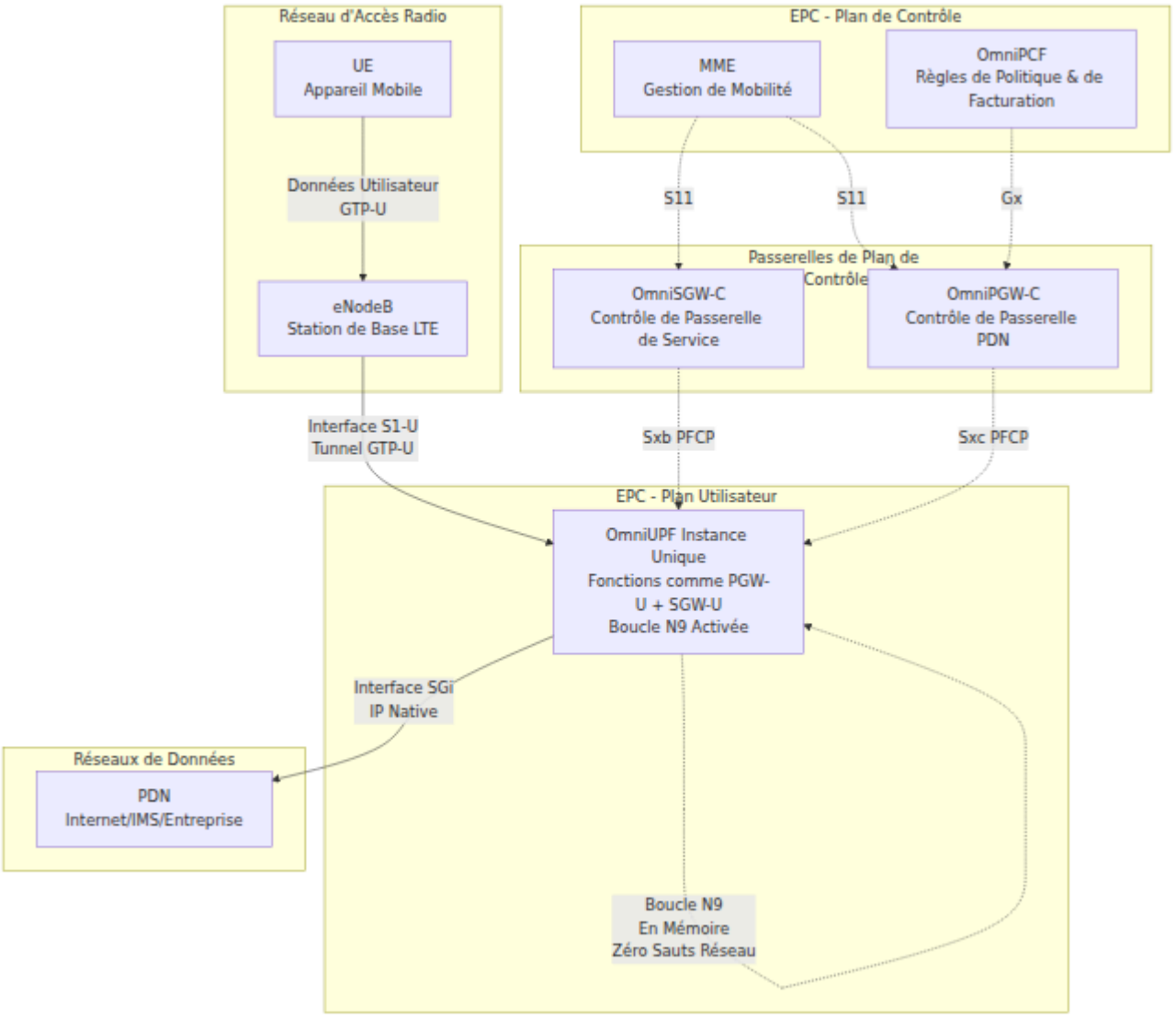
OmniUPF détecte automatiquement lorsqu'un SMF redémarre et nettoie les sessions orphelines conformément aux spécifications 3GPP TS 29.244.

Comment Ça Fonctionne :

Lorsqu'un SMF établit une association PFCP, il fournit un **Horodatage de Récupération** indiquant quand il a démarré. OmniUPF stocke cet horodatage pour chaque association. Si le SMF redémarre :

1. Le SMF perd tout l'état de session en mémoire
2. Le SMF rétablit l'association PFCP avec le UPF
3. Le SMF envoie **un nouvel Horodatage de Récupération** (différent de l'avant)
4. UPF détecte le changement d'horodatage = SMF redémarré
5. UPF supprime automatiquement **toutes les sessions orphelines** de l'ancienne instance SMF
6. Le SMF crée de nouvelles sessions pour les abonnés actifs

Flux de Détection de Redémarrage :



Exemple de Journal :

Lorsqu'un SMF redémarre, vous verrez :

```
WARN: Association avec NodeID: smf-1 et adresse: 192.168.1.10
existe déjà
WARN: L'Horodatage de Récupération du SMF a changé (ancien : 2025-
01-15T10:00:00Z, nouveau : 2025-01-15T10:30:15Z) - SMF redémarré,
suppression de 245 sessions orphelines
INFO: Suppression de la session orpheline 2 (LocalSEID) en raison
du redémarrage du SMF
INFO: Suppression de la session orpheline 3 (LocalSEID) en raison
du redémarrage du SMF
...
INFO: Suppression de la session orpheline 246 (LocalSEID) en
raison du redémarrage du SMF
```

Notes Importantes :

1. **Isolation** : Seules les sessions du SMF redémarré sont supprimées. Les autres associations SMF et leurs sessions ne sont **pas affectées**.

2. **Comparaison d'Horodatage** : Si l'Horodatage de Récupération est **identique**, les sessions sont **conservées** (SMF reconnecté sans redémarrage).

3. **Conformité 3GPP** : Ce comportement est imposé par la section 5.22.2 de 3GPP TS 29.244 :

   > "Si l'Horodatage de Récupération de la fonction CP a changé depuis le dernier Établissement d'Association, la fonction UP doit considérer que la fonction CP a redémarré et doit supprimer toutes les sessions PFCP associées à cette fonction CP."

Pour le dépannage des sessions orphelines, voir Détection des Sessions Orphelines.

Gestion des Indications d'Erreur GTP-U

OmniUPF gère les messages d'Indication d'Erreur GTP-U des pairs en aval (PGW-U, SGW-U, eNodeB, gNodeB) conformément aux spécifications 3GPP TS

29.281.

Qu'est-ce que les Indications d'Erreur :

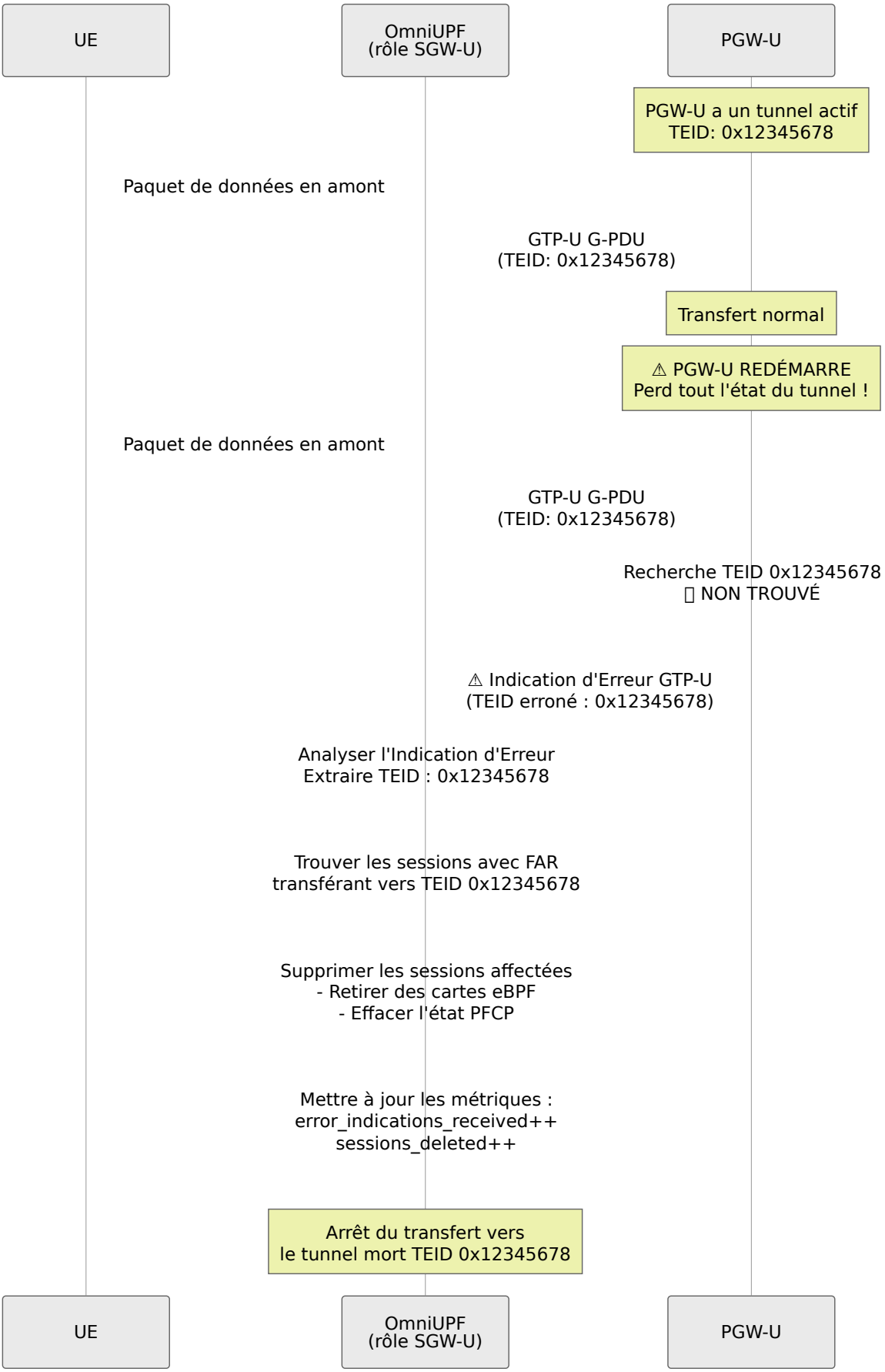
Lorsque OmniUPF transfère un paquet GTP-U à un pair distant (par exemple, PGW-U dans un déploiement SGW-U), le pair peut renvoyer une **Indication d'Erreur** s'il ne reconnaît pas le TEID (Tunnel Endpoint Identifier). Cela indique :

- Le pair distant a redémarré et a perdu l'état du tunnel
- Le tunnel n'a jamais été créé du côté distant (mismatch de configuration)
- Le tunnel a déjà été supprimé du côté distant

Comment Ça Fonctionne :

1. **UPF transfère le paquet** → Envoie un paquet GTP-U avec TEID X au pair distant (port 2152)
2. **Le pair distant ne reconnaît pas TEID X** → Recherche TEID dans sa table de tunnels, non trouvé
3. **Le pair distant envoie une Indication d'Erreur** → Message GTP-U type 26 avec IE contenant le TEID erroné
4. **UPF reçoit l'Indication d'Erreur** → Analyse le message pour extraire TEID X
5. **UPF trouve les sessions affectées** → Recherche toutes les sessions pour les FARs transférant vers TEID X
6. **UPF supprime les sessions** → Retire les sessions des cartes eBPF et de l'état PFCP
7. **UPF met à jour les métriques** → Incrémente les compteurs Prometheus pour la surveillance

Flux d'Indication d'Erreur :



Format de Paquet (3GPP TS 29.281 Section 7.3.1) :

```
Indication d'Erreur GTP-U :
┌─────────────────────────────────────────────┐
│ En-tête GTP-U (12 octets)                   │
├─────────────────────────────────────────────┤
│ Version, PT, Flags          │ 0x32          │
│ Type de Message                │ 26 (0x1A)  │
│ Longueur                     │ 9 octets     │
│ TEID                         │ 0 (toujours) │
│ Numéro de Séquence              │ varie     │
│ Numéro N-PDU                 │ 0            │
│ Prochain En-tête d'Extension      │ 0         │
├─────────────────────────────────────────────┤
│ IE : Données TEID I (5 octets)              │
├─────────────────────────────────────────────┤
│ Type                         │ 16 (0x10)    │
│ TEID erroné               │ 4 octets        │
└─────────────────────────────────────────────┘
```

Quand Cela Compte :

Scénario 1 : Redémarrage de PGW-U dans l'Architecture GTP S5/S8

- SGW-U (OmniUPF) transfère le trafic S5/S8 vers PGW-U
- PGW-U redémarre et perd tout l'état du tunnel S5/S8
- SGW-U continue de transférer vers les anciens TEIDs
- PGW-U envoie des Indications d'Erreur
- SGW-U **arrête automatiquement d'utiliser les tunnels morts**

Scénario 2 : Redémarrage du Pair UPF dans l'Architecture N9

- UPF-1 (OmniUPF) transfère le trafic N9 vers UPF-2
- UPF-2 redémarre
- UPF-1 reçoit des Indications d'Erreur
- UPF-1 nettoie les sessions

Exemple de Journal :

Lors de la réception d'une Indication d'Erreur :

```
WARN: Reçu Indication d'Erreur GTP-U de 192.168.50.10:2152 pour
TEID 0x12345678 - le pair distant ne reconnaît pas ce TEID
WARN: Session LocalSEID=42 trouvée avec FAR GlobalId=1 transférant
vers le TEID erroné 0x12345678 du pair 192.168.50.10
INFO: Suppression de la session LocalSEID=42 en raison de
l'Indication d'Erreur GTP-U pour TEID 0x12345678 de 192.168.50.10
WARN: Supprimé 1 session(s) en raison de l'Indication d'Erreur
GTP-U pour TEID 0x12345678 du pair 192.168.50.10
```

Métriques Prometheus :

Surveillez l'activité des Indications d'Erreur avec granularité par pair et par nœud :

```
# Total des Indications d'Erreur reçues des pairs
upf_buffer_listener_error_indications_received_total{node_id="pgw-u-
1",peer_address="192.168.50.10"}

# Sessions supprimées en raison d'Indications d'Erreur
upf_buffer_listener_error_indication_sessions_deleted_total{node_id="
u-1",peer_address="192.168.50.10"}

# Indications d'Erreur envoyées (pour TEIDs entrants inconnus)
upf_buffer_listener_error_indications_sent_total{node_id="enodeb-
1",peer_address="10.60.0.1"}
```

Étiquettes de Métriques :

- `node_id` : ID de nœud PFCP de l'association (ou "inconnu" si aucune association n'existe)
- `peer_address` : Adresse IP du pair distant

Ces métriques aident à identifier les pairs problématiques et à suivre les modèles d'Indication d'Erreur par nœud de plan de contrôle.

Notes Importantes :

1. **Nettoyage Automatique** : Aucune intervention de l'opérateur nécessaire - les sessions sont supprimées automatiquement

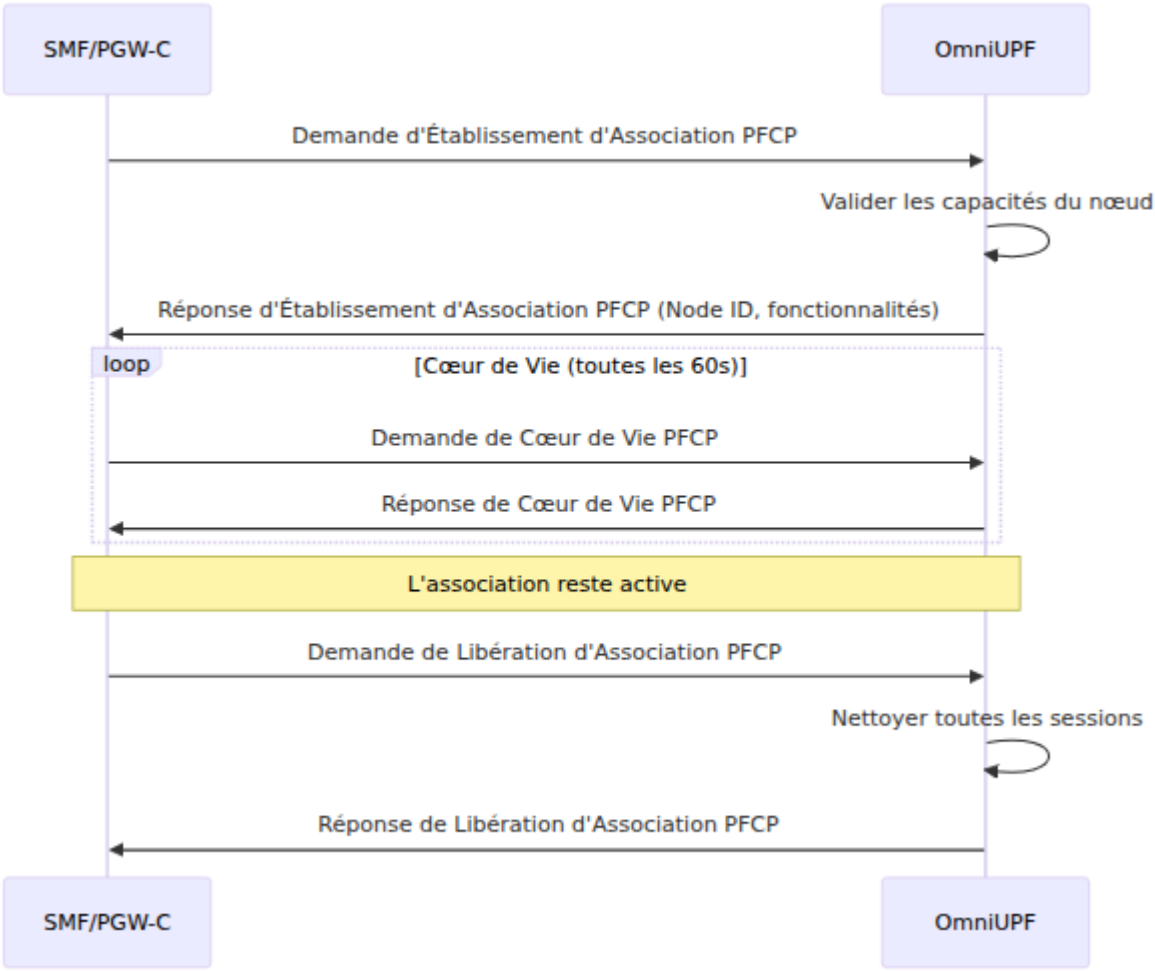
2. **Correspondance de TEID** : Seules les sessions avec des FARs transférant vers le TEID erroné exact sont supprimées
3. **Isolation par Pair** : Les Indications d'Erreur d'un pair n'affectent que les sessions transférant vers ce pair
4. **Sessions Multiples** : Si plusieurs sessions transfèrent vers le même TEID mort, **toutes sont supprimées**
5. **Complémentaire à l'Horodatage de Récupération** :
    - Détection d'Horodatage de Récupération = proactif (détecte le redémarrage lors de l'établissement de l'association)
    - Gestion des Indications d'Erreur = réactif (détecte les tunnels morts lorsque le trafic circule)
6. **Gestion des Paquets Malformés** : Les Indications d'Erreur invalides sont enregistrées et ignorées (aucune session supprimée)

Pour le dépannage des Indications d'Erreur, voir Débogage des Indications d'Erreur GTP-U.

Création de Session PFCP

Lorsqu'un UE établit une session PDU (5G) ou un contexte PDP (LTE), le SMF crée une session PFCP au niveau du UPF.

Flux d'Établissement de Session :



Contenu Typique de Session :

- **PDR Montant** : Correspondance sur TEID N3, transfert via FAR vers N6
- **PDR Descendant** : Correspondance sur l'adresse IP de l'UE, transfert via FAR vers N3 avec encapsulation GTP-U
- **FAR** : Paramètres de transfert (création d'en-tête externe, instance réseau)
- **QER** : Limites de QoS (MBR, GBR) et marquage de paquets (QFI)
- **URR** : Rapport de volume pour la facturation (optionnel)

Modification de Session PFCP

Le SMF peut modifier les sessions pour des événements de mobilité (transfert), des changements de QoS ou des mises à jour de service.

Scénarios de Modification Courants :

1. **Transfert (basé sur N2)**

- Mettre à jour le FAR montant avec le nouveau point de terminaison de tunnel gNB (F-TEID)
- Optionnellement mettre en mémoire tampon les paquets pendant le changement de chemin
- Vider le tampon vers le nouveau chemin lorsque prêt

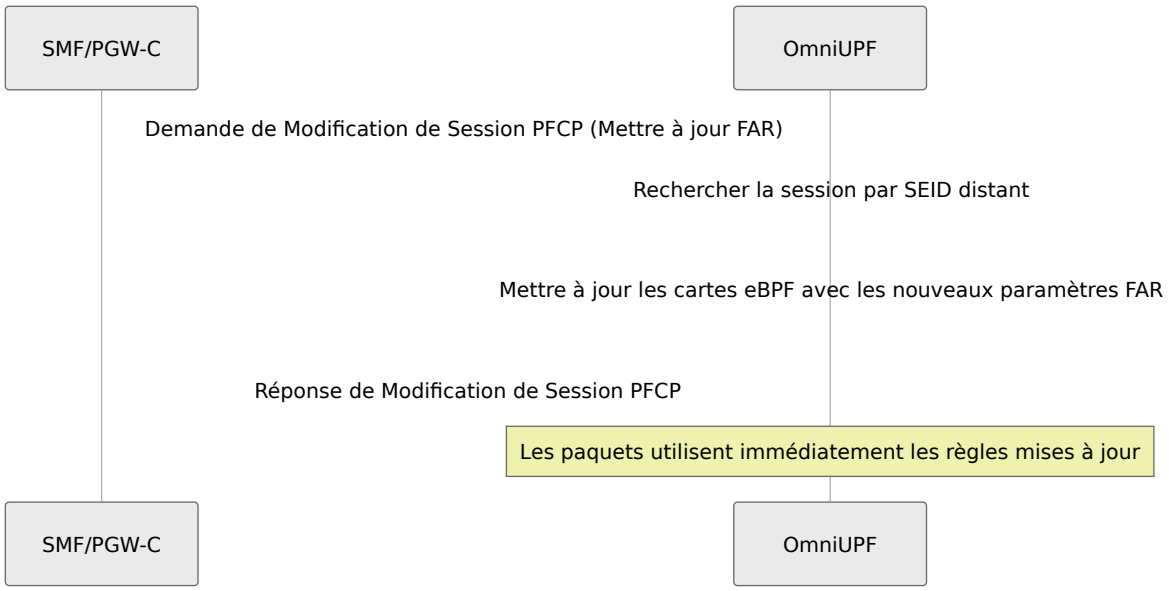
2. **Changement de QoS**

   - Mettre à jour le QER avec de nouvelles valeurs MBR/GBR
   - Peut ajouter/supprimer des filtres SDF dans PDR pour une QoS spécifique à l'application

3. **Mise à Jour de Service**

   - Ajouter de nouveaux PDRs pour des flux de trafic supplémentaires
   - Modifier les FARs pour des changements de routage

Flux de Modification de Session :

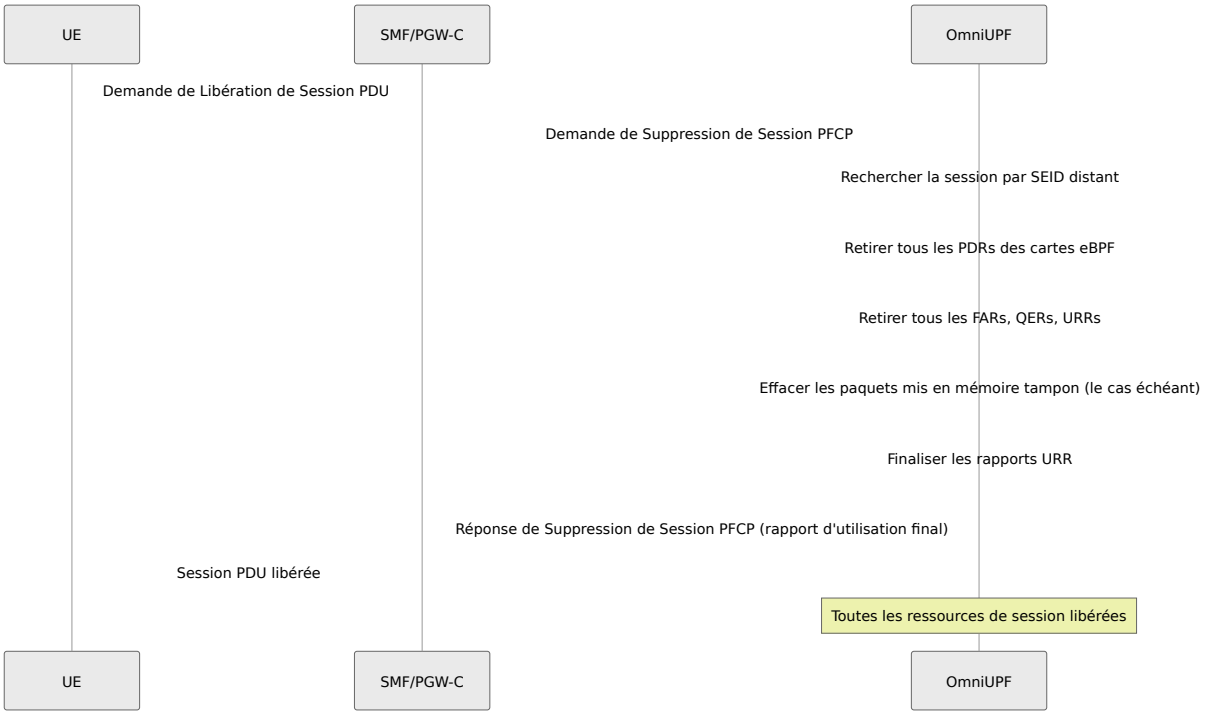


Pour la gestion des règles, voir Guide de Gestion des Règles.

Suppression de Session PFCP

Lorsqu'une session PDU est libérée, le SMF supprime la session PFCP au niveau du UPF.

Flux de Suppression de Session :



Nettoyage Effectué :

- Tous les PDRs supprimés (montant et descendant)
- Tous les FARs, QERs, URRs supprimés
- Tampons de paquets effacés
- Rapport d'utilisation final envoyé au SMF pour la facturation

Opérations Courantes

OmniUPF fournit des capacités opérationnelles complètes via son panneau de contrôle basé sur le web et son API REST. Cette section couvre les tâches opérationnelles courantes et leur signification.

Surveillance des Sessions

Comprendre les Sessions PFCP :

Les sessions PFCP représentent les sessions PDU actives de l'UE (5G) ou les contextes PDP (LTE). Chaque session contient :

- SEIDs local et distant (Identificateurs de Point de Terminaison de Session)
- PDRs pour la classification des paquets
- FARs pour les décisions de transfert
- QERs pour l'application de la QoS (optionnel)
- URRs pour le suivi d'utilisation (optionnel)

Opérations Clés sur les Sessions :

- **Voir toutes les sessions** avec adresses IP UE, TEIDs et compte de règles
- **Filtrer les sessions** par adresse IP ou TEID
- **Inspecter les détails de session** y compris les configurations complètes PDR/FAR/QER/URR
- **Surveiller les comptes de session** par association PFCP

Pour des procédures détaillées sur les sessions, voir Vue des Sessions.

Gestion des Règles

Règles de Détection de Paquets (PDR) :

Les PDRs déterminent quels paquets correspondent à des flux de trafic spécifiques. Les opérateurs peuvent :

- **Voir les PDRs montants** indexés par TEID de l'interface N3
- **Voir les PDRs descendants** indexés par adresse IP de l'UE (IPv4 et IPv6)
- **Inspecter les filtres SDF** pour la classification spécifique à l'application
- **Surveiller les comptes de PDR** et l'utilisation de la capacité

Règles d'Action de Transfert (FAR) :

Les FARs définissent quoi faire avec les paquets correspondants. Les opérateurs peuvent :

- **Voir les actions FAR** (TRANSMETTRE, SUPPRIMER, METTRE EN MÉMOIRE TAMBOUR, DUPLIQUER, NOTIFIER)

- **Inspecter les paramètres de transfert** (création d'en-tête externe, destination)
- **Surveiller l'état de mise en mémoire tampon** par FAR
- **Basculer la mise en mémoire tampon** pour des FAR spécifiques pendant le dépannage

Règles d'Application de la QoS (QER) :

Les QERs appliquent des limites de bande passante et marquent les paquets. Les opérateurs peuvent :

- **Voir les paramètres de QoS** (MBR, GBR, marquage de paquets)
- **Surveiller les QERs actives** par session
- **Inspecter les marquages QFI** pour les flux QoS 5G

Règles de Rapport d'Utilisation (URR) :

Les URRs suivent les volumes de données pour la facturation. Les opérateurs peuvent :

- **Voir les compteurs de volume** (montant, descendant, total d'octets)
- **Surveiller les seuils d'utilisation** et les déclencheurs de rapport
- **Inspecter les URRs actives** à travers toutes les sessions

Pour les opérations sur les règles, voir Guide de Gestion des Règles.

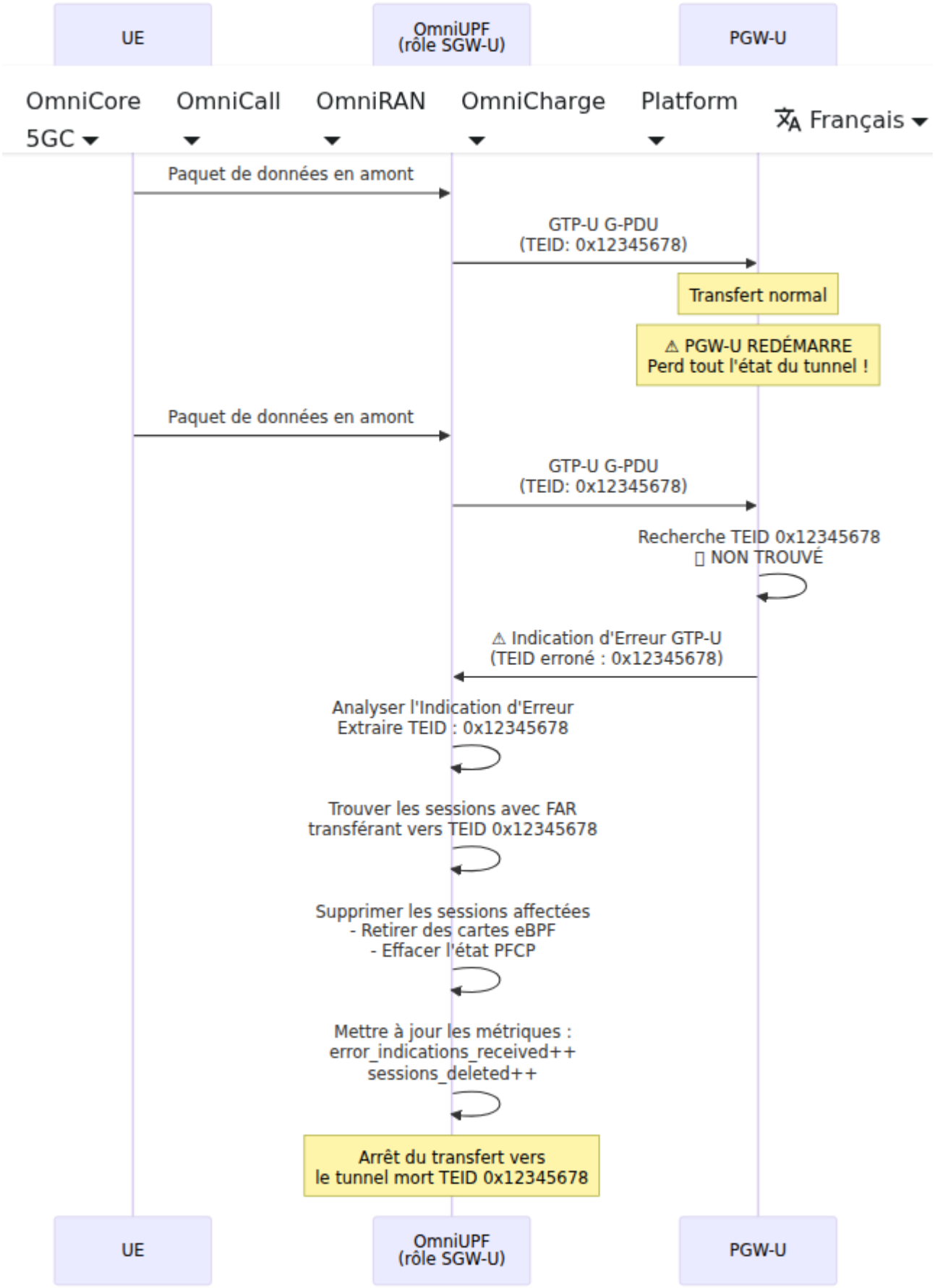
Mise en Mémoire Tampon des Paquets

Pourquoi la Mise en Mémoire Tampon est Critique pour le UPF

La mise en mémoire tampon des paquets est l'une des fonctions les plus importantes d'un UPF car elle empêche la perte de paquets lors d'événements de mobilité et de reconfigurations de session. Sans mise en mémoire tampon, les utilisateurs mobiles connaîtraient des connexions interrompues, des téléchargements interrompus et des communications en temps réel échouées chaque fois qu'ils se déplacent entre des tours cellulaires ou lorsque les conditions du réseau changent.

Le Problème : Perte de Paquets Pendant la Mobilité

Dans les réseaux mobiles, les utilisateurs sont constamment en mouvement. Lorsqu'un appareil passe d'une tour cellulaire à une autre (transfert), ou lorsque le réseau doit reconfigurer le chemin de données, il existe une fenêtre critique où les paquets sont en vol mais le nouveau chemin n'est pas encore prêt :



Sans mise en mémoire tampon : Les paquets arrivant pendant cette fenêtre critique seraient **perdus**, causant :

- **Des connexions TCP qui se bloquent** ou se réinitialisent (navigation web, téléchargements interrompus)
- **Des appels vidéo qui se figent** ou se coupent (Zoom, Teams, appels WhatsApp échouent)
- **Des sessions de jeu qui se déconnectent** (jeux en ligne, applications en temps réel échouent)
- **Des appels VoIP qui ont des lacunes** ou se coupent entièrement (appels téléphoniques interrompus)
- **Des téléchargements qui échouent** et doivent redémarrer

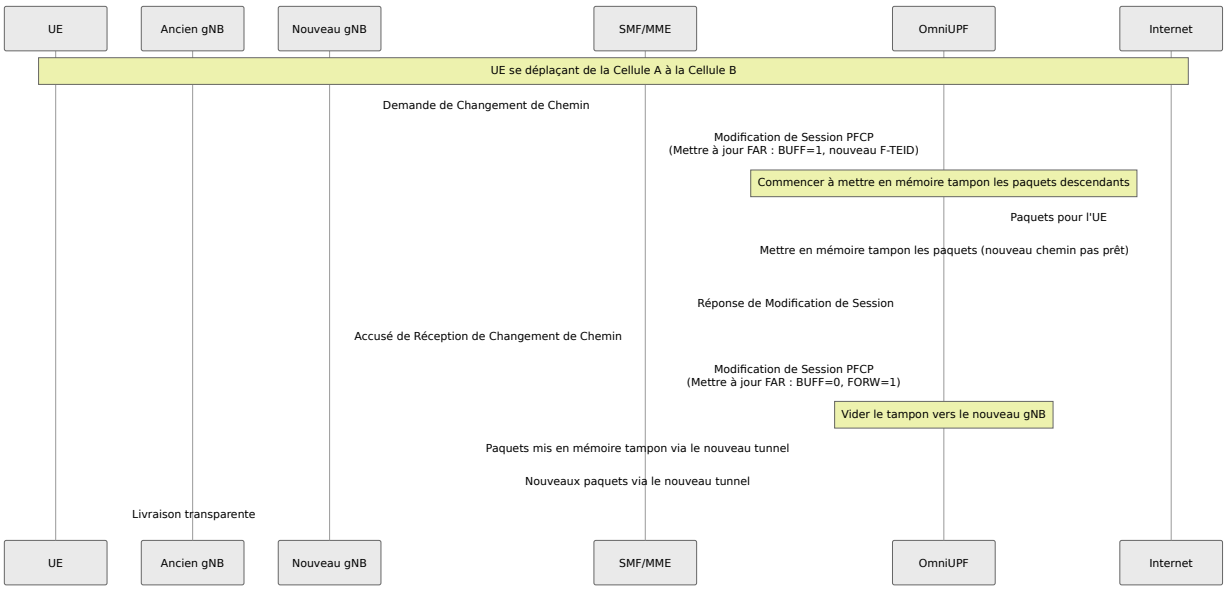
Avec mise en mémoire tampon : OmniUPF maintient temporairement les paquets jusqu'à ce que le nouveau chemin soit établi, puis les transfère sans problème. L'utilisateur connaît une **absence d'interruption**.

Quand la Mise en Mémoire Tampon Se Produit

OmniUPF met en mémoire tampon les paquets dans ces scénarios critiques :

1. Transfert Basé sur N2 (5G) / Transfert Basé sur X2 (4G)

Lorsque un UE se déplace entre des tours cellulaires :



Chronologie :

- **T+0ms** : Ancien chemin encore actif

- **T+10ms** : SMF dit à UPF de mettre en mémoire tampon (ancien chemin se fermant, nouveau chemin pas prêt)
- **T+10-50ms** : **Fenêtre critique de mise en mémoire tampon** - les paquets arrivent mais ne peuvent pas être transférés
- **T+50ms** : Nouveau chemin prêt, SMF dit à UPF de transférer
- **T+50ms+** : UPF vide les paquets mis en mémoire tampon vers le nouveau chemin, puis transfère de nouveaux paquets normalement

Sans mise en mémoire tampon : ~40ms de paquets (potentiellement des milliers) seraient **perdus**. **Avec mise en mémoire tampon** : Aucune perte de paquets, transfert transparent.

---

2. Modification de Session (Changement de QoS, Mise à Jour de Chemin)

Lorsque le réseau doit changer les paramètres de session :

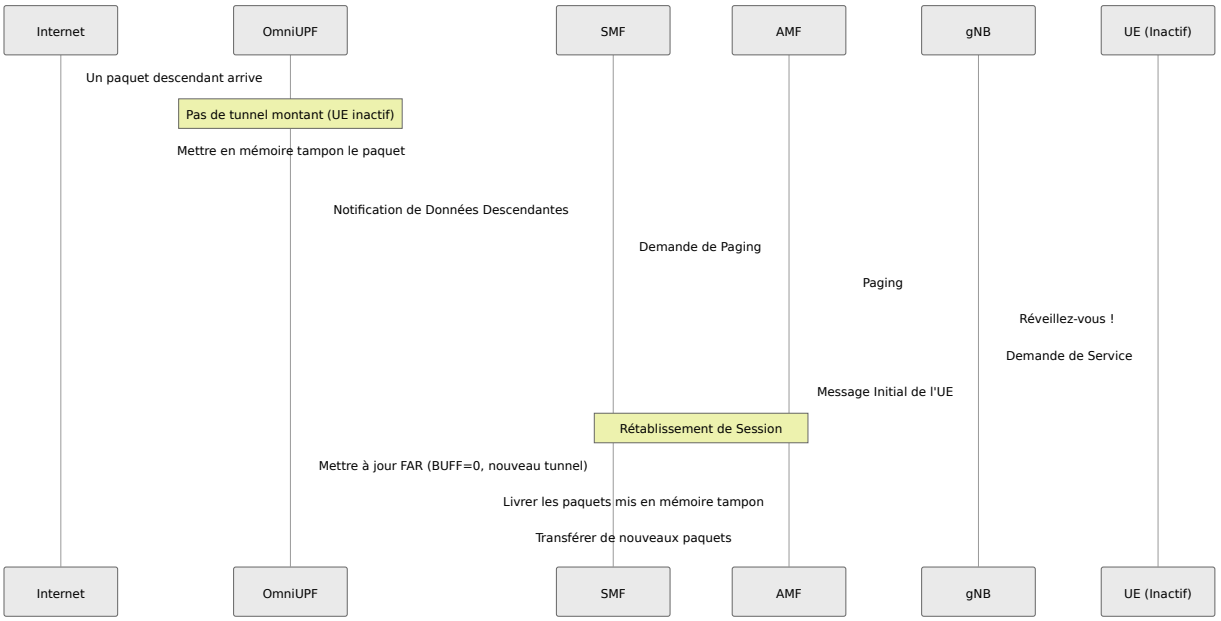
- **Mise à niveau/diminution de QoS** : L'utilisateur passe de la couverture 4G à 5G (mode NSA)
- **Changement de politique** : L'utilisateur d'entreprise entre dans le campus d'entreprise (changement de direction du trafic)
- **Optimisation du réseau** : Le réseau central redirige le trafic vers un UPF plus proche (mise à jour ULCL)

Pendant la modification, le plan de contrôle peut avoir besoin de mettre à jour plusieurs règles de manière atomique. La mise en mémoire tampon garantit que les paquets ne sont pas transférés avec des ensembles de règles partiels/incohérents.

---

3. Notification de Données Descendantes (Récupération en Mode Inactif)

Lorsque un UE est en mode inactif (écran éteint, économie de batterie) et que des données descendantes arrivent :



Sans mise en mémoire tampon : Le paquet initial qui a déclenché la notification serait **perdu**, nécessitant que l'expéditeur retransmette (ajoute de la latence). **Avec mise en mémoire tampon** : Le paquet qui a réveillé l'UE est livré immédiatement lorsque l'UE se reconnecte.

---

4. Transfert Inter-RAT (4G ↔ 5G)

Lorsque un UE se déplace entre la couverture 4G et 5G :

- Changements d'architecture (eNodeB ↔ gNB)
- Changements de points de terminaison de tunnel (nouvelle allocation de TEID)
- La mise en mémoire tampon garantit une transition fluide entre les types de RAT

Comment la Mise en Mémoire Tampon Fonctionne dans OmniUPF

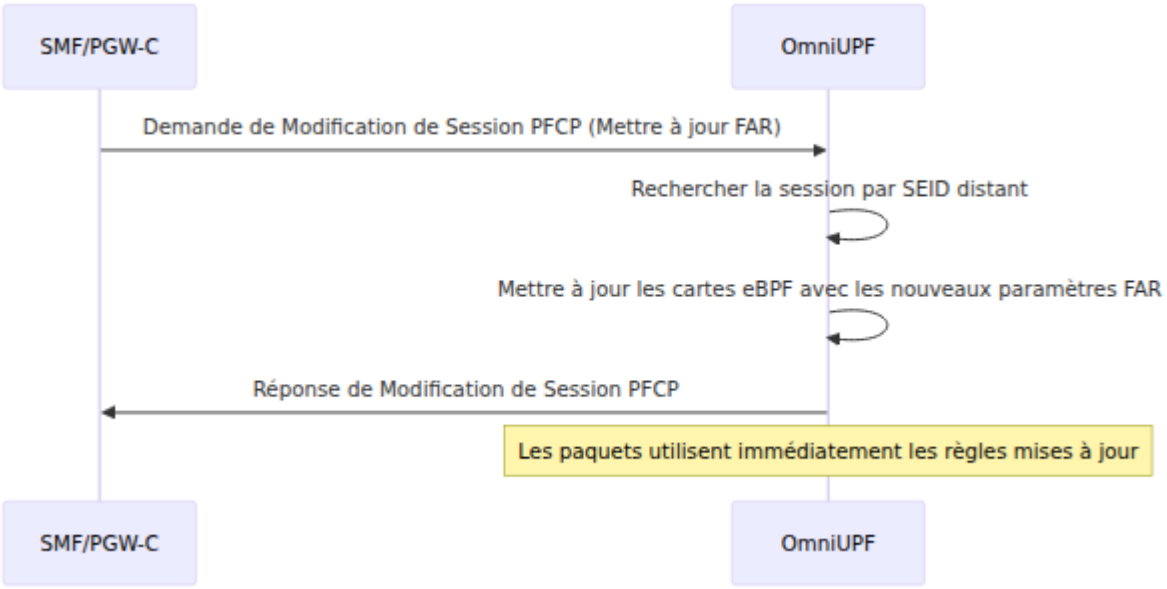
Mécanisme Technique :

OmniUPF utilise une **architecture de mise en mémoire tampon à deux niveaux** :

1. **Niveau eBPF (Noyau)** : Détecte les paquets nécessitant une mise en mémoire tampon en fonction des drapeaux d'action FAR

2. **Niveau Utilisateur** : Stocke et gère les paquets mis en mémoire tampon en mémoire

Processus de Mise en Mémoire Tampon :



Détails Clés :

- **Port de Tampon** : Port UDP 22152 (paquets envoyés du eBPF à l'espace utilisateur)
- **Encapsulation** : Paquets enveloppés dans GTP-U avec ID FAR comme TEID
- **Stockage** : Tampons en mémoire par FAR avec métadonnées (horodatage, direction, taille de paquet)
- **Limites** :
  - Limite par FAR : 10 000 paquets (par défaut)
  - Limite globale : 100 000 paquets à travers tous les FARs
  - TTL : 30 secondes (par défaut) - les paquets plus anciens que TTL sont supprimés
- **Nettoyage** : Un processus en arrière-plan retire les paquets expirés toutes les 60 secondes

Cycle de Vie du Tampon :

1. **Mise en Mémoire Tampon Activée** : SMF définit l'action FAR BUFF=1 (bit 2) via la Modification de Session PFCP
2. **Paquets Mis en Mémoire Tampon** : eBPF détecte le drapeau BUFF, encapsule les paquets, envoie au port 22152

3. **Stockage Utilisateur** : Le gestionnaire de tampons stocke les paquets avec ID FAR, horodatage, direction
4. **Mise en Mémoire Tampon Désactivée** : SMF définit l'action FAR FORW=1, BUFF=0 avec de nouveaux paramètres de transfert
5. **Vider le Tampon** : L'espace utilisateur rejoue les paquets mis en mémoire tampon en utilisant les nouvelles règles FAR (nouveau point de terminaison de tunnel)
6. **Reprendre Normal** : Les nouveaux paquets sont transférés immédiatement via le nouveau chemin

---

Pourquoi Cela Compte pour l'Expérience Utilisateur

Impact dans le Monde Réel :

Scénario	Sans Mise en Mémoire Tampon	Avec Mise en Mémoire Tampon
Appel Vidéo Pendant le Transfert	L'appel se fige pendant 1-2 secondes, peut se couper	Transparent, aucune interruption
Téléchargement de Fichier à la Limite Cellulaire	Le téléchargement échoue, doit redémarrer	Le téléchargement continue sans interruption
Jeu en Ligne en Déplacement	La connexion se coupe, expulsé du jeu	Jeu fluide, aucune déconnexion
Appel VoIP dans la Voiture	L'appel se coupe à chaque transfert	Clair comme de l'eau de roche, aucune coupure
Vidéo en Streaming dans un Train	La vidéo se met en mémoire tampon, la qualité baisse	Lecture fluide
Point d'Accès Mobile pour Ordinateur Portable	La session SSH se coupe, l'appel vidéo échoue	Toutes les connexions maintenues

Avantages pour l'Opérateur de Réseau :

- **Taux de Chute d'Appel Réduit (CDR)** : KPI critique pour la qualité du réseau
- **Satisfaction Client Élevée** : Les utilisateurs ne remarquent pas les transferts
- **Coûts de Support Plus Bas** : Moins de plaintes concernant les connexions interrompues
- **Avantage Concurrentiel** : Marketing "meilleur réseau pour la couverture"

Opérations de Gestion des Tampons

Les opérateurs peuvent surveiller et contrôler la mise en mémoire tampon via l'interface Web et l'API :

Surveillance :

- **Voir les paquets mis en mémoire tampon** par ID FAR (compte, octets, âge)
- **Suivre l'utilisation du tampon** par rapport aux limites (par FAR, global)
- **Alerte sur le débordement du tampon** ou la durée excessive de mise en mémoire tampon
- **Identifier les tampons bloqués** (paquets mis en mémoire tampon > seuil TTL)

Opérations de Contrôle :

- **Vider les tampons** : Déclencher manuellement la rejouée du tampon (dépannage)
- **Effacer les tampons** : Supprimer les paquets mis en mémoire tampon (nettoyer les tampons bloqués)
- **Ajuster le TTL** : Changer le temps d'expiration des paquets
- **Modifier les limites** : Augmenter la capacité du tampon par FAR ou globale

Dépannage :

- **Tampon ne se vidant pas** : Vérifiez si le SMF a envoyé la mise à jour de FAR pour désactiver la mise en mémoire tampon
- **Débordement de tampon** : Augmentez les limites ou enquêtez sur les raisons pour lesquelles la durée de mise en mémoire tampon est excessive
- **Paquets anciens dans le tampon** : Le TTL peut être trop élevé, ou la mise à jour de FAR retardée
- **Mise en Mémoire Tampon Excessive** : Peut indiquer des problèmes de mobilité ou des problèmes avec le SMF

Pour des opérations détaillées sur les tampons, voir Guide de Gestion des Tampons.

Configuration du Tampon

Configurez le comportement de mise en mémoire tampon dans `/etc/omniupf/runtime.exs` :

```
# Paramètres de Tampon
buffer_port = 22152                # Port UDP pour les paquets mis
en mémoire tampon (par défaut)
```

Recommandations :

- **Réseaux à haute mobilité** (autoroutes, trains) : Augmentez `buffer_max_packets` à 20 000+
- **Zones urbaines denses** (transferts fréquents) : Diminuez `buffer_packet_ttl` à 15s
- **Applications à faible latence** : Réglez `buffer_packet_ttl` à 10s pour éviter les données obsolètes
- **Réseaux IoT** : Diminuez les limites (les appareils IoT génèrent moins de trafic pendant le transfert)

Pour des options de configuration complètes, voir Guide de Configuration.

Statistiques et Surveillance

Statistiques des Paquets :

Métriques de traitement des paquets en temps réel comprenant :

- **Paquets RX** : Total reçus de toutes les interfaces
- **Paquets TX** : Total transmis vers toutes les interfaces
- **Paquets Supprimés** : Paquets rejetés en raison d'erreurs ou de politiques
- **Paquets GTP-U** : Comptes de paquets encapsulés

Statistiques de Route :

Métriques de transfert par route :

- **Hits de Route** : Paquets correspondants à chaque route
- **Comptes de Transfert** : Succès/échec par destination
- **Compteurs d'Erreur** : TEIDs invalides, IPs UE inconnues

Statistiques XDP :

Métriques de performance eXpress Data Path :

- **XDP traités** : Paquets gérés au niveau XDP
- **XDP passés** : Paquets envoyés à la pile réseau
- **XDP supprimés** : Paquets supprimés au niveau XDP
- **XDP abandonnés** : Erreurs de traitement

Statistiques des Interfaces N3/N6 :

Comptes de trafic par interface :

- **N3 RX/TX** : Trafic vers/depuis RAN (gNB/eNodeB)
- **N6 RX/TX** : Trafic vers/depuis le réseau de données
- **Comptes totaux de paquets** : Statistiques agrégées par interface

Pour des détails sur la surveillance, voir Guide de Surveillance.

Gestion de Capacité

Surveillance de la Capacité des Cartes eBPF :

La performance du UPF dépend de la capacité des cartes eBPF. Les opérateurs peuvent :

- **Surveiller l'utilisation des cartes** avec des indicateurs de pourcentage en temps réel
- **Voir les limites de capacité** pour chaque carte eBPF
- **Alertes codées par couleur** :
  - Vert (<50%) : Normal
  - Jaune (50-70%) : Prudence
  - Ambre (70-90%) : Avertissement

    - Rouge (>90%) : Critique

Cartes Critiques à Surveiller :

- `uplink_pdr_map` : Classification du trafic montant
- `downlink_pdr_map` : Classification du trafic descendant IPv4
- `far_map` : Règles de transfert
- `qer_map` : Règles de QoS
- `urr_map` : Suivi d'utilisation

Planification de Capacité :

- Chaque PDR consomme une entrée de carte (taille de clé + taille de valeur)
- La capacité de la carte est configurée au démarrage du UPF (limite de mémoire du noyau)
- Dépasser la capacité entraîne des échecs d'établissement de session

Pour la surveillance de la capacité, voir Gestion de Capacité.

Gestion de Configuration

Configuration du UPF :

Voir et vérifier les paramètres opérationnels du UPF :

- **Interface N3** : Adresse IP pour la connectivité RAN (GTP-U)
- **Interface N6** : Adresse IP pour la connectivité au réseau de données
- **Interface N9** : Adresse IP pour la communication inter-UPF (optionnel)
- **Interface PFCP** : Adresse IP pour la connectivité SMF
- **Port API** : Port d'écoute de l'API REST
- **Point de terminaison des métriques** : Port des métriques Prometheus

Configuration du Dataplane :

Paramètres actifs du chemin de données eBPF :

- **Adresse N3 active** : Liaison de l'interface N3 au runtime

- **Adresse N9 active** : Liaison de l'interface N9 au runtime (si activée)

Pour la visualisation de la configuration, voir [Vue de Configuration]
(./docs/WEB_UI.md#configuration-view

Guide d'Architecture OmniUPF

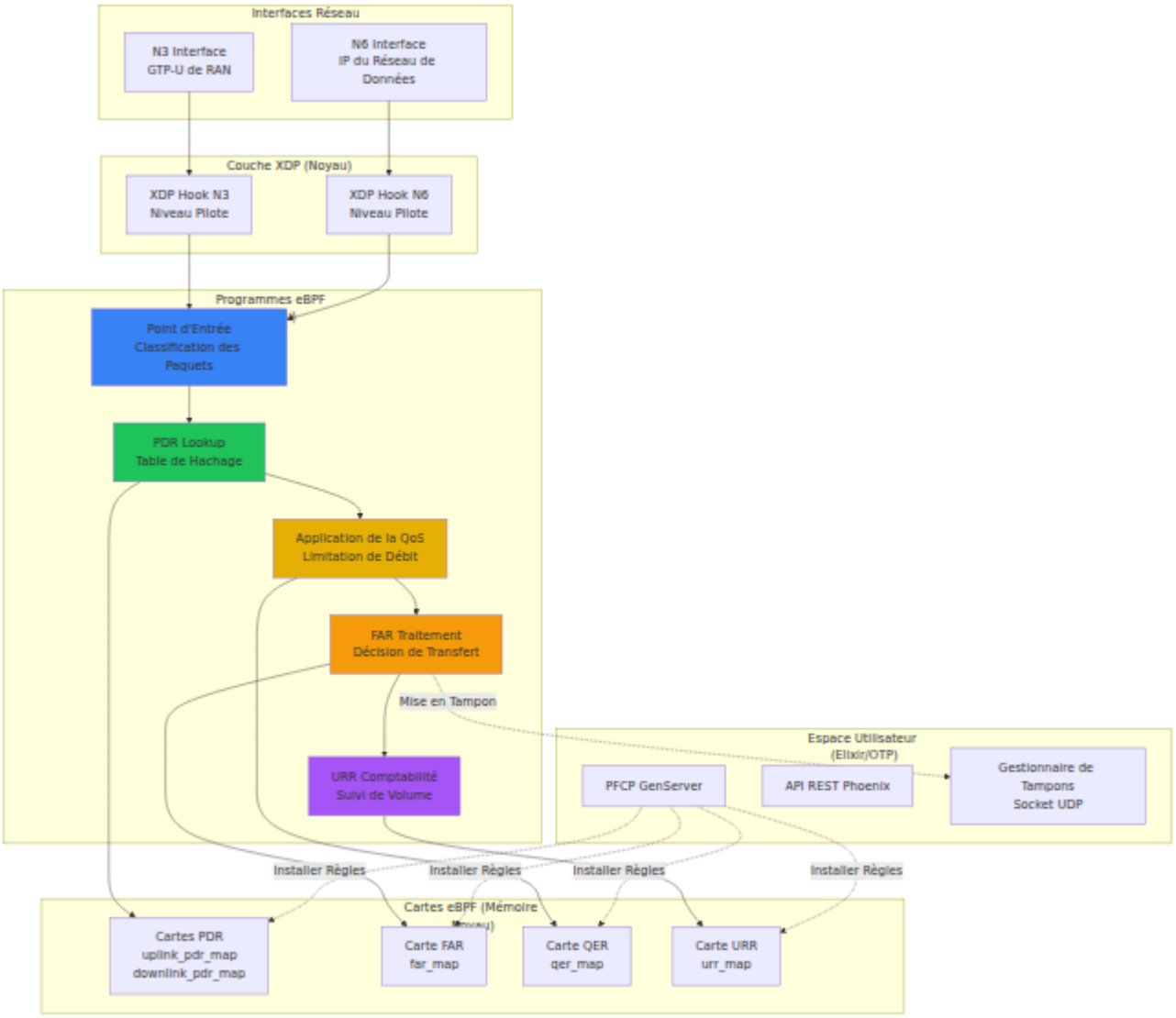
Table des Matières

Aperçu

OmniUPF exploite eBPF (extended Berkeley Packet Filter) et XDP (eXpress Data Path) pour atteindre des performances de qualité opérateur pour le traitement des paquets 5G/LTE. Le plan de contrôle est implémenté en Elixir/OTP utilisant la gestion de session PFCP basée sur GenServer, tandis que le plan de données exécute des programmes eBPF directement dans le noyau Linux. Cette séparation élimine la surcharge du traitement des paquets en espace utilisateur et atteint un débit multi-gigabit avec une latence en microsecondes.

Le fichier objet eBPF (`ipentrypoint_bpf.o`) est compilé à partir de la source C (dans le répertoire `ebpf/xdp/`) et chargé à l'exécution par le plan de contrôle Elixir via des liaisons NIF à libbpf.

Couches d'Architecture



Principes de Conception Clés

Traitement Zero-Copy:

- Paquets traités entièrement dans l'espace noyau
- Pas de copie de données entre le noyau et l'espace utilisateur
- Manipulation directe des paquets utilisant XDP

Structures de Données Sans Verrou:

- Les cartes eBPF utilisent des tables de hachage par CPU
- Opérations atomiques pour un accès concurrent
- Pas de surcharge de mutex/spinlock

Prêt pour le Déchargement Matériel:

- Le mode de déchargement XDP prend en charge l'exécution SmartNIC
- Compatible avec les cartes réseau prenant en charge XDP
- Retour aux modes natifs ou génériques du pilote

Fondation Technologique eBPF

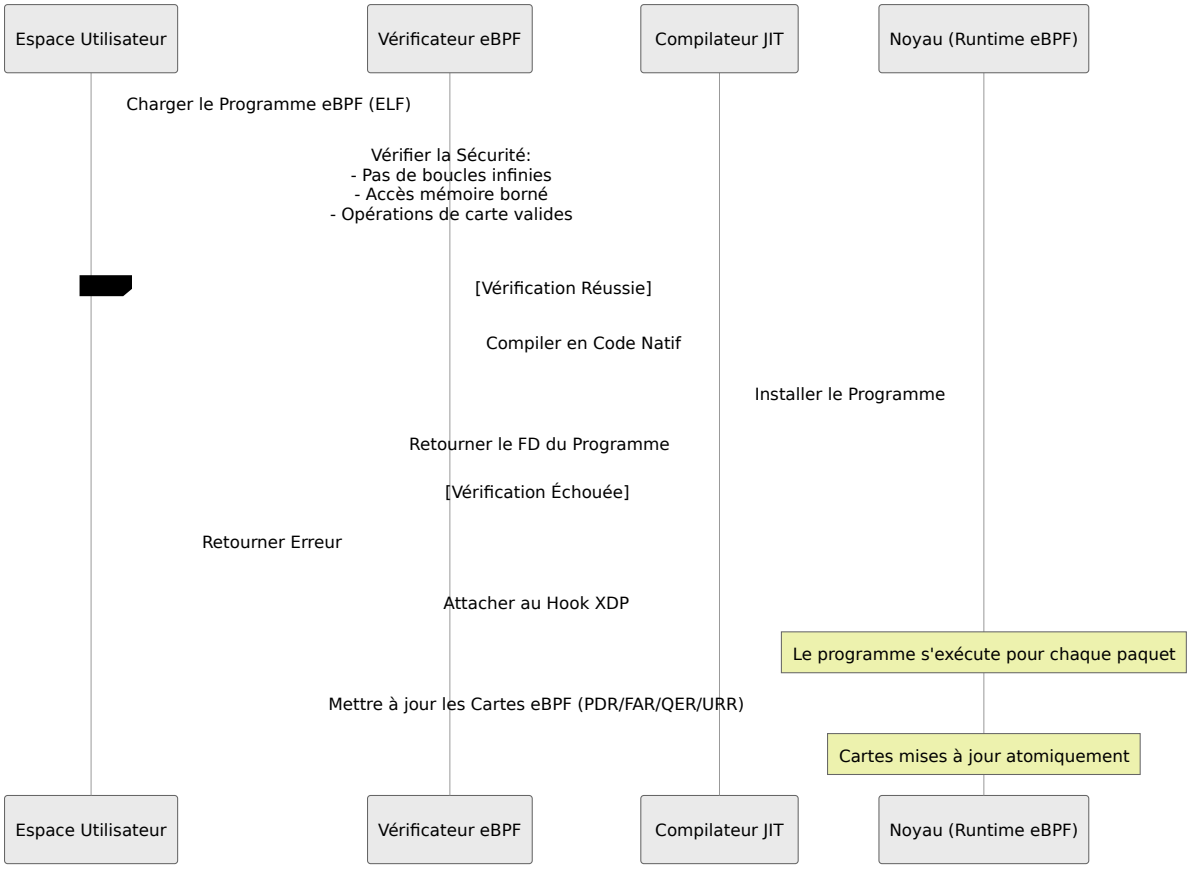
Qu'est-ce que eBPF ?

eBPF (extended Berkeley Packet Filter) est une technologie révolutionnaire du noyau Linux qui permet à des programmes sûrs et isolés de s'exécuter dans l'espace noyau sans modifier le code source du noyau ou charger des modules noyau.

Caractéristiques Clés:

- **Sécurité**: Le vérificateur eBPF garantit que les programmes ne peuvent pas faire planter le noyau
- **Performance**: S'exécute à la vitesse native du noyau (pas de surcharge d'interprétation)
- **Flexibilité**: Peut être mis à jour à l'exécution sans redémarrage du noyau
- **Observabilité**: Tracage et statistiques intégrés

Cycle de Vie du Programme eBPF



Cartes eBPF

Les cartes eBPF sont des structures de données noyau partagées entre les programmes eBPF et l'espace utilisateur.

Types de Cartes Utilisées dans OmniUPF:

Type de Carte	Description	Cas d'Utilisation
`BPF_MAP_TYPE_HASH`	Table de hachage avec paires clé-valeur	Recherche PDR par TEID ou IP UE
`BPF_MAP_TYPE_ARRAY`	Tableau indexé par entier	Recherche QER, FAR, URR par ID
`BPF_MAP_TYPE_PERCPU_HASH`	Table de hachage par CPU (sans verrou)	Recherches PDR haute performance
`BPF_MAP_TYPE_LRU_HASH`	Hachage LRU (Least Recently Used)	Éviction automatique des anciennes entrées

Opérations sur les Cartes:

- **Recherche**: O(1) recherche par hachage (sous-microseconde)
- **Mise à jour**: Mises à jour atomiques depuis l'espace utilisateur
- **Suppression**: Suppression immédiate des entrées
- **Itérer**: Opérations par lots pour les vidages de carte

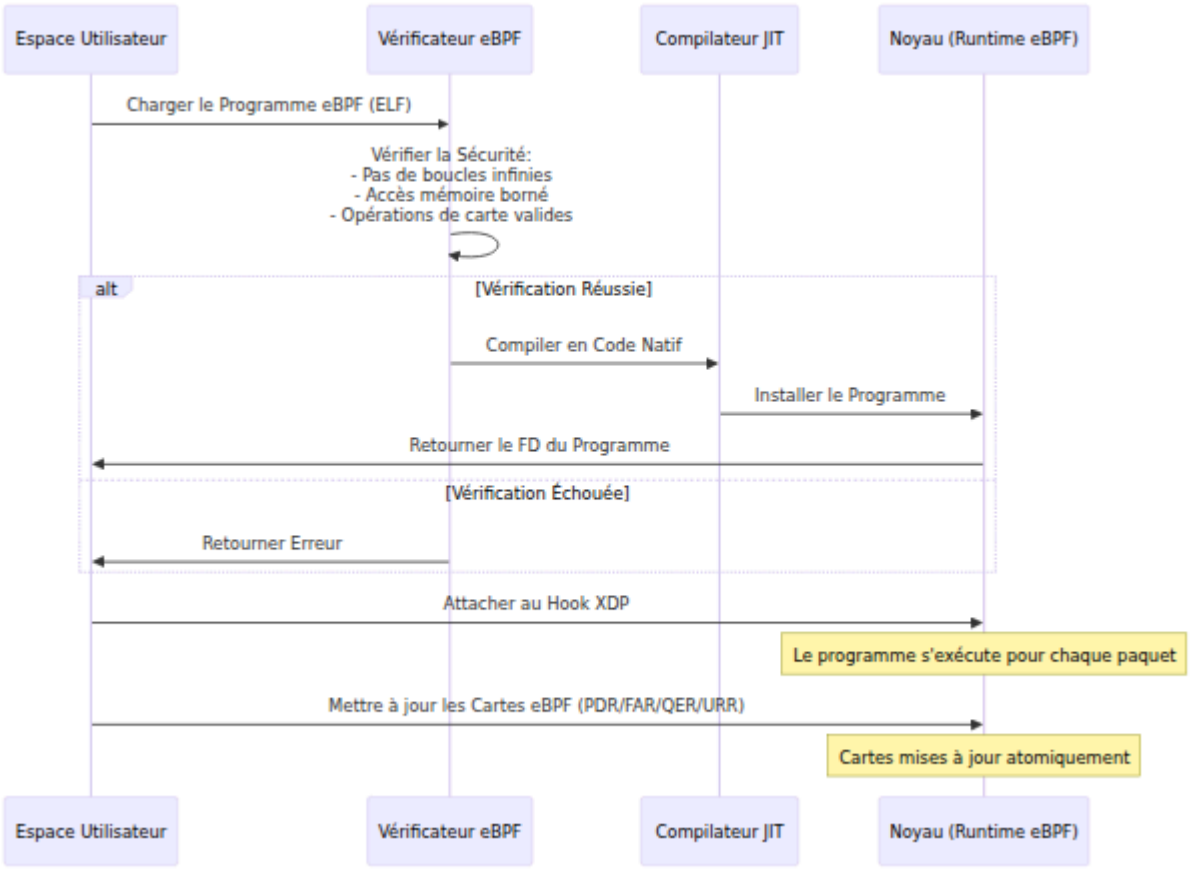
Chemin de Données XDP

Aperçu de XDP

XDP (eXpress Data Path) est un hook du noyau Linux qui permet aux programmes eBPF de traiter les paquets au point le plus précoce possible—juste après que le pilote réseau les ait reçus, avant la pile réseau du noyau.

Modes d'Attachement XDP

OmniUPF prend en charge trois modes d'attachement XDP, chacun avec des caractéristiques de performance et de compatibilité différentes.



1. Mode de Déchargement XDP

Exécution Matérielle (Meilleure Performance):

- Le programme eBPF s'exécute directement sur le matériel SmartNIC
- Traitement des paquets dans le NIC sans toucher au CPU
- Atteint un débit de 100 Gbps+
- Nécessite un SmartNIC compatible (Netronome, Mellanox ConnectX-6)

Configuration (dans `runtime.exs`):

```
xdp_attach_mode = "offload"
```

Limitations:

- Nécessite un matériel SmartNIC coûteux
- Complexité du programme eBPF limitée
- Toutes les fonctionnalités eBPF ne sont pas prises en charge dans le matériel

---

2. Mode XDP Natif (Par Défaut pour la Production)

Exécution au Niveau du Pilote (Haute Performance):

- Le programme eBPF s'exécute dans le contexte du pilote réseau
- Les paquets sont traités avant l'allocation de SKB (socket buffer)
- Atteint 10-40 Gbps par cœur
- Nécessite un pilote avec support XDP (la plupart des pilotes modernes)

Configuration (dans `runtime.exs`):

```
xdp_attach_mode = "native"
```

Avantages:

- Performance très élevée (multi-million pps)
- Large compatibilité matérielle
- Ensemble complet de fonctionnalités eBPF

Pilotes Supportés:

- Intel: i40e, ice, ixgbe, igb
- Mellanox: mlx4, mlx5
- Broadcom: bnxt
- Amazon: ena
- La plupart des cartes réseau 10G+

---

3. Mode XDP Générique

Émulation Logicielle (Compatibilité):

- Le programme eBPF s'exécute après que le noyau ait alloué SKB
- Émulation logicielle du comportement XDP
- Fonctionne sur n'importe quelle interface réseau
- Utile pour les tests et le développement

Configuration (dans `runtime.exs`):

```
xdp_attach_mode = "generic"
```

Cas d'Utilisation:

- Développement et tests
- Environnements virtualisés (VM sans SR-IOV)
- Matériel réseau plus ancien
- Tests d'interface de boucle

Performance: 1-5 Gbps (significativement plus lent que natif/déchargement)

Codes de Retour XDP

Les programmes eBPF retournent des codes d'action XDP pour indiquer au noyau quoi faire avec les paquets:

Code de Retour	Signification	Utilisation dans OmniUPF
`XDP_PASS`	Envoyer le paquet à la pile réseau du noyau	Mise en tampon (livraison locale), ICMP, trafic inconnu
`XDP_DROP`	Supprimer le paquet immédiatement	Paquets invalides, limitation de débit, suppressions de politique
`XDP_TX`	Transmettre le paquet à nouveau par la même interface	Pas actuellement utilisé
`XDP_REDIRECT`	Envoyer le paquet à une interface différente	Chemin de transfert principal (N3 ↔ N6)
`XDP_ABORTED`	Erreur de traitement, supprimer le paquet et journaliser	Erreurs de programme eBPF

Pipeline de Traitement des Paquets

Structure du Programme

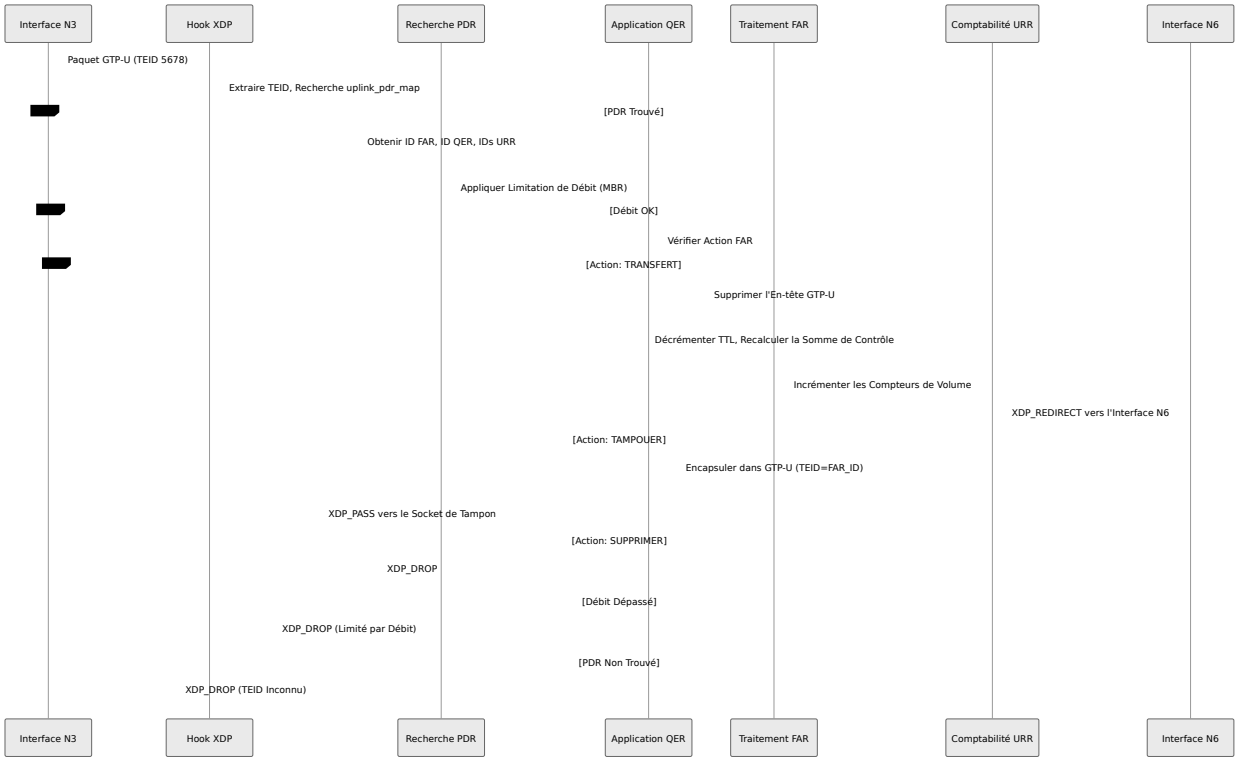
OmniUPF utilise des appels de queue eBPF pour créer un pipeline de traitement des paquets modulaire.

Appels de Queue:

- Permettent aux programmes eBPF d'appeler d'autres programmes eBPF
- Réutilisent le même cadre de pile (profondeur de pile bornée)
- Permettent une conception de pipeline modulaire

- Profondeur maximale d'appel de queue de 33

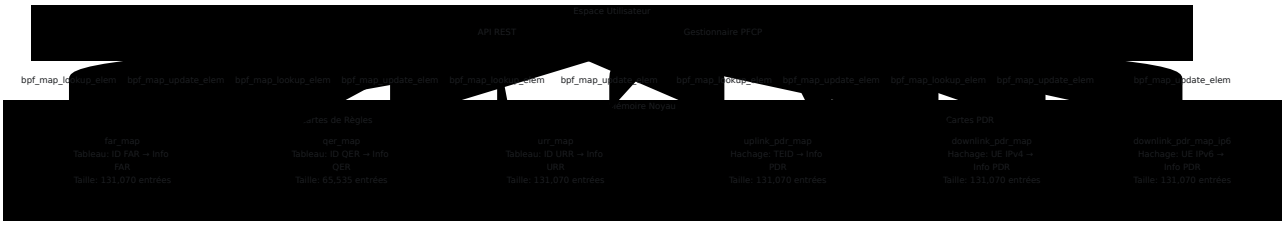
Traitement des Paquets Uplink



Traitement des Paquets Downlink

Architecture des Cartes eBPF

Disposition de la Mémoire des Cartes



Dimensionnement des Cartes

OmniUPF calcule automatiquement les tailles des cartes en fonction de la configuration `max_sessions`:

```
Cartes PDR = 2 × max_sessions  (uplink + downlink)
Cartes FAR = 2 × max_sessions  (uplink + downlink)
Cartes QER = 1 × max_sessions  (partagées par session)
Cartes URR = 3 × max_sessions  (plusieurs URRs par session)
```

Exemple (max_sessions = 65,535):

- Cartes PDR: 131,070 entrées chacune
- Carte FAR: 131,070 entrées
- Carte QER: 65,535 entrées
- Carte URR: 131,070 entrées

Mémoire Totale:

```
Cartes PDR: 3 × 131,070 × 212 B = ~83 MB
Carte FAR:  131,070 × 20 B = ~2.6 MB
Carte QER:  65,535 × 36 B = ~2.3 MB
Carte URR:  131,070 × 20 B = ~2.6 MB
Total: ~91 MB de mémoire noyau
```

Mécanisme de Mise en Tampon

Aperçu de la Mise en Tampon

OmniUPF implémente la mise en tampon des paquets pour les scénarios de transfert en encapsulant les paquets dans GTP-U et en les envoyant à un processus en espace utilisateur via un socket UDP.

Architecture de Mise en Tampon

Parse error on line 4: ...outer l'En-tête UDP (port 22152)
3. ----------
-----^ Expecting 'SQE', 'DOUBLECIRCLEEND', 'PE', '-)', 'STADIUMEND',
'SUBROUTINEEND', 'PIPE', 'CYLINDEREND', 'DIAMOND_STOP', 'TAGEND',
'TRAPEND', 'INVTRAPEND', 'UNICODE_TEXT', 'TEXT', 'TAGSTART', got 'PS'

Réessayer

Détails de l'Encapsulation de Tampon

Lorsque la mise en tampon est activée (bit d'action FAR 2 défini), le programme eBPF :

1. **Calcule la Taille du Paquet Original**:

```
orig_packet_len = ntohs(ip->tot_len);  // À partir de l'en-tête IP
```

2. **Élargit l'En-tête du Paquet**:

```
// Ajouter de l'espace pour: IP Extérieure + UDP + GTP-U
gtp_encap_size = sizeof(struct iphdr) + sizeof(struct udphdr) + sizeof(struct gtpuhdr);
bpf_xdp_adjust_head(ctx, -gtp_encap_size);
```

3. **Construit l'En-tête IP Extérieur**:

```
ip->saddr = original_sender_ip;  // Préserver la source pour éviter le filtrage martien
ip->daddr = local_upf_ip;        // IP locale où le listener en espace utilisateur se lie
ip->protocol = IPPROTO_UDP;
ip->ttl = 64;
```

4. **Construit l'En-tête UDP**:

```
udp->source = htons(22152);  // BUFFER_UDP_PORT
udp->dest = htons(22152);
udp->len = htons(sizeof(udphdr) + sizeof(gtpuhdr) +
orig_packet_len);
```

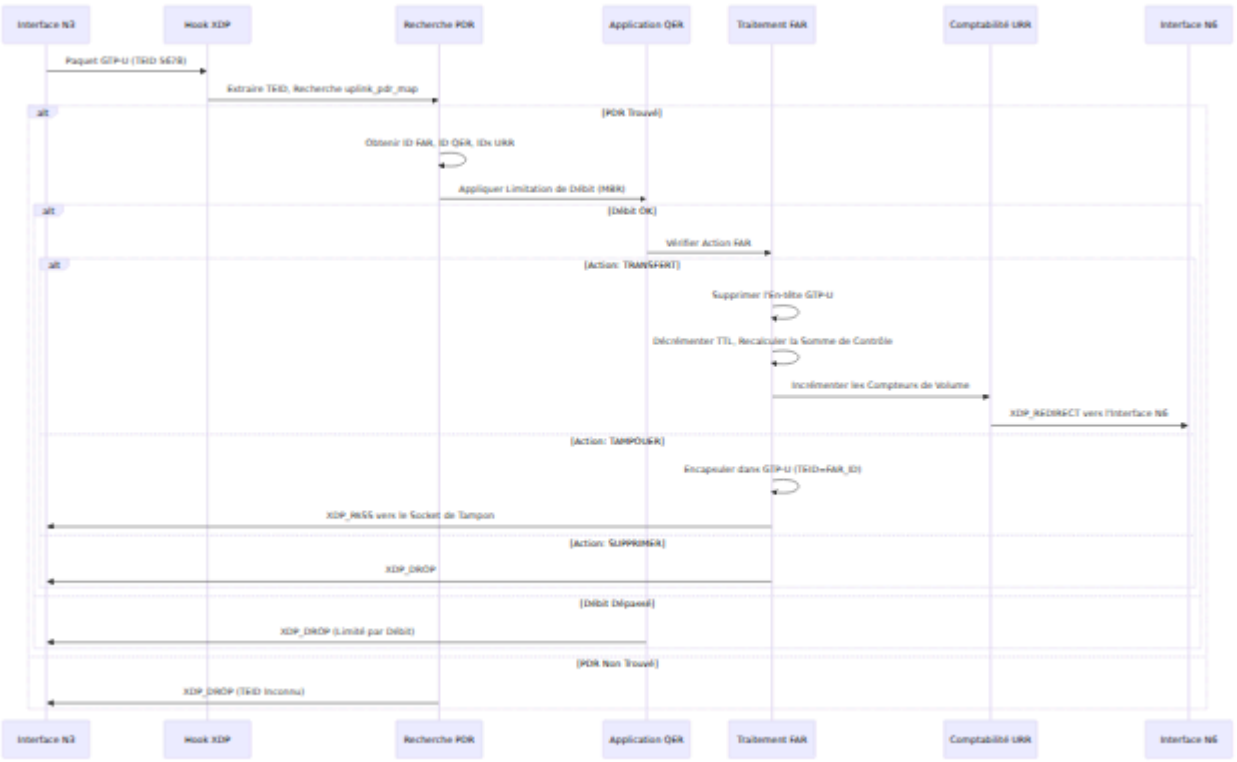
5. **Construit l'En-tête GTP-U**:

```
gtp->version = 1;
gtp->message_type = GTPU_G_PDU;
gtp->teid = htonl(far_id | (direction << 24));  // Encoder l'ID
FAR et la direction
gtp->message_length = htons(orig_packet_len);
```

6. **Retourne XDP_PASS**:
    - Le noyau livre le paquet au socket UDP local sur le port 22152
    - Le gestionnaire de tampons en espace utilisateur reçoit et stocke le paquet

Opération de Vidage de Tampon

Lorsque le transfert est terminé, le SMF met à jour le FAR pour effacer le drapeau BUFFER. Les paquets mis en tampon sont rejoués :



Paramètres de Gestion de Tampon

Paramètre	Par Défaut	Description
Max par FAR	10,000 paquets	Nombre maximum de paquets mis en tampon par FAR
Max Total	100,000 paquets	Nombre maximum total de paquets mis en tampon
TTL du Paquet	30 secondes	Temps avant que les paquets mis en tampon n'expirent
Port de Tampon	22152	Port UDP pour la livraison des tampons
Intervalle de Nettoyage de Tampon	60 secondes	Fréquence de vérification des paquets expirés

Application de la QoS

Algorithme de Limitation de Débit

OmniUPF implémente un **limiteur de débit à fenêtre glissante** pour l'application de la QoS.

Parse error on line 5: ...taille_paquet × 8 × (NSEC_PER_SEC / débi ----------
-------^ Expecting 'SQE', 'DOUBLECIRCLEEND', 'PE', '-)', 'STADIUMEND',
'SUBROUTINEEND', 'PIPE', 'CYLINDEREND', 'DIAMOND_STOP', 'TAGEND',
'TRAPEND', 'INVTRAPEND', 'UNICODE_TEXT', 'TEXT', 'TAGSTART', got 'PS'

Réessayer

Mise en Œuvre de la Fenêtre Glissante

Algorithme (dans `qer.h`):

```c
static __always_inline enum xdp_action limit_rate_sliding_window(
    const __u64 packet_size,
    volatile __u64 *window_start,
    const __u64 rate)
{
    static const __u64 NSEC_PER_SEC = 1000000000ULL;
    static const __u64 window_size = 5000000ULL;  // fenêtre de 5ms

    // Débit = 0 signifie illimité
    if (rate == 0)
        return XDP_PASS;

    // Calculer le temps de transmission pour ce paquet
    __u64 tx_time = packet_size * 8 * (NSEC_PER_SEC / rate);
    __u64 now = bpf_ktime_get_ns();

    // Vérifier si nous sommes en avance sur la fenêtre (le paquet serait transmis dans le futur)
    __u64 start = *window_start;
    if (start + tx_time > now)
        return XDP_DROP;  // Limite de débit dépassée

    // Si la fenêtre est passée, la réinitialiser
    if (start + window_size < now) {
        *window_start = now - window_size + tx_time;
        return XDP_PASS;
    }

    // Mettre à jour la fenêtre pour tenir compte de ce paquet
    *window_start = start + tx_time;
    return XDP_PASS;
}
```

Paramètres Clés:

- **Taille de la Fenêtre**: 5ms (5,000,000 nanosecondes)
- **Par Direction**: Fenêtres séparées pour uplink et downlink
- **Mises à Jour Atomiques**: Utilise des pointeurs volatils pour un accès concurrent
- **MBR = 0**: Considéré comme une bande passante illimitée

Exemple de Calcul de QoS

Scénario: MBR = 100 Mbps, Taille du Paquet = 1500 octets

1. **Temps de Transmission**:

```
tx_time = 1500 octets × 8 bits/octet × (1,000,000,000 ns/sec ÷
100,000,000 bps)
tx_time = 1500 × 8 × 10 = 120,000 ns = 120 µs
```

2. **Vérification de Débit**:

   - Si le dernier paquet transmis à `t=0`, le prochain paquet peut être transmis à `t=120µs`
   - Si le paquet arrive à `t=100µs`, il est supprimé (trop tôt)
   - Si le paquet arrive à `t=150µs`, il est transmis (fenêtre avancée)

3. **Taux de Paquet Maximum**:

```
Max PPS = (100 Mbps ÷ 8) ÷ 1500 octets = 8,333 paquets/seconde
Espace entre les paquets = 120 µs
```

Caractéristiques de Performance

Débit

Configuration	Débit	Paquets/Seconde	Latence
XDP Déchargement (SmartNIC)	100 Gbps	148 Mpps	< 1 µs
XDP Natif (NIC 10G, cœur unique)	10 Gbps	8 Mpps	2-5 µs
XDP Natif (NIC 10G, 4 cœurs)	40 Gbps	32 Mpps	2-5 µs
XDP Générique	1-5 Gbps	0.8-4 Mpps	50-100 µs

Répartition de la Latence

Latence Totale de Traitement des Paquets (XDP Natif):

Étape	Latence	Cumulative
RX NIC	0.5 µs	0.5 µs
Invocation du Hook XDP	0.1 µs	0.6 µs
Recherche PDR (Hachage)	0.3 µs	0.9 µs
Vérification de Débit QER	0.1 µs	1.0 µs
Traitement FAR	0.5 µs	1.5 µs
Mise à Jour URR	0.2 µs	1.7 µs
Encapsulation/Décapsulation GTP-U	0.8 µs	2.5 µs
XDP_REDIRECT	0.5 µs	3.0 µs
TX NIC	0.5 µs	3.5 µs

Total: ~3.5 µs par paquet (XDP Natif, NIC 10G)

Utilisation du CPU

Capacité de Traitement par Cœur:

- Cœur unique: 8-10 Mpps (XDP Natif)
- Avec hyper-threading: 12-15 Mpps
- Scalabilité multi-cœurs: presque linéaire jusqu'à 8 cœurs

Utilisation du CPU par Taux de Paquet:

```
CPU % ≈ (Taux de Paquet / 10,000,000) × 100% par cœur
```

Exemple: Un trafic de 2 Mpps utilise ~20% d'un cœur

Bande Passante Mémoire

Accès aux Cartes eBPF:

- Recherche par hachage: ~100 ns (hit de cache)
- Recherche par hachage: ~300 ns (miss de cache)
- Recherche par tableau: ~50 ns (toujours hit de cache)

Bande Passante Mémoire Requise:

```
Bande Passante = Taux de Paquet × (Taille Moyenne du Paquet +
Recherches de Carte × 64 octets)
```

Exemple: 10 Mpps × (1500 B + 3 recherches × 64 B) ≈ 160 Gbps de bande passante mémoire

Scalabilité et Réglage

Scalabilité Horizontale

Instances UPF Multiples:

Setting SMF as parent of SMF would create a cycle

Réessayer

Distribution des Sessions:

- Le SMF distribue les sessions entre les instances UPF
- Chaque UPF gère un sous-ensemble des sessions UE
- Pas de communication inter-UPF nécessaire (sans état)

Scalabilité Verticale

Réglage du CPU:

1. Activer l'affinité CPU pour le traitement XDP

2. Utiliser RSS (Receive Side Scaling) pour distribuer les files d'attente RX
3. Fixer les programmes eBPF à des cœurs spécifiques

Réglage du NIC:

1. Augmenter la taille du tampon RX
2. Activer les NIC multi-files d'attente (RSS)
3. Utiliser le directeur de flux pour le routage du trafic

Réglage du Noyau:

```
# Augmenter la limite de mémoire verrouillée pour les cartes eBPF
ulimit -l unlimited

# Désactiver l'équilibre des IRQ pour les cœurs XDP
systemctl stop irqbalance

# Définir le gouverneur CPU sur performance
cpupower frequency-set -g performance

# Augmenter les tailles de tampon réseau
sysctl -w net.core.rmem_max=134217728
sysctl -w net.core.wmem_max=134217728
```

Planification de Capacité

Formule:

```
Cœurs CPU Requis = (PPS Attendu ÷ 10,000,000) × 1.5  (50% de
marge)
Mémoire Requise = (Sessions Max × 212 B × 3) + 100 MB (cartes eBPF
+ surcharge)
Réseau Requis = (Débit de Pointe × 2) + 10 Gbps (marge)
```

Exemple (1 million de sessions, 20 Gbps de pointe):

- CPU: (20 Gbps ÷ 10 Gbps par cœur) × 1.5 = 3-4 cœurs
- Mémoire: (1M × 212 B × 3) + 100 MB ≈ 750 MB

- Réseau: (20 Gbps × 2) + 10 Gbps = 50 Gbps interfaces

Documentation Connexe

- **Guide des Opérations UPF** - Opérations générales et déploiement UPF
- **Guide de Gestion des Règles** - Détails sur PDR, FAR, QER, URR
- **Guide de Surveillance** - Surveillance de performance et métriques
- **Guide des Opérations de l'Interface Web** - Utilisation du panneau de contrôle
- **Guide de Dépannage** - Problèmes courants et diagnostics
- **Guide du Jardin Clos** - Redirection hors crédit utilisant le mécanisme BUFFER pour l'interception de paquets en espace utilisateur

Guide de Configuration d'OmniUPF

Table des Matières

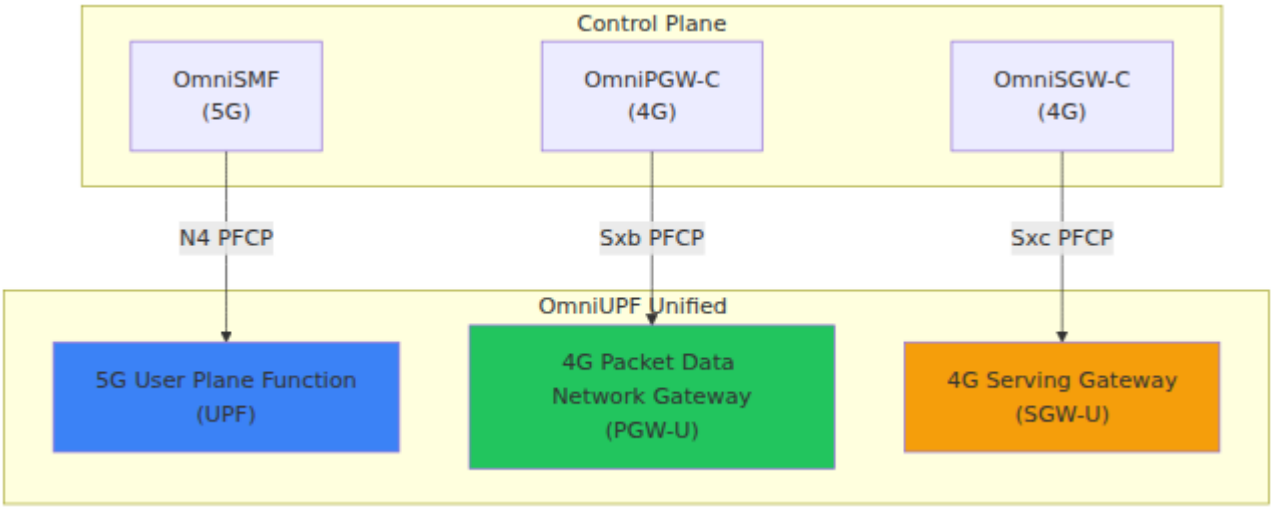
Aperçu

OmniUPF est une fonction de plan utilisateur polyvalente qui peut fonctionner en plusieurs modes pour prendre en charge à la fois les réseaux de cœur 4G (EPC) et 5G. Le plan de contrôle est implémenté en Elixir/OTP, et la configuration est gérée via un fichier de configuration Elixir (`runtime.exs`).

Lors de l'installation du paquet, le fichier de configuration est placé à `/etc/omniupf/runtime.exs` et préservé lors des mises à jour. Le UPF doit être redémarré après des modifications de configuration.

Modes de Fonctionnement

OmniUPF est une **plateforme unifiée** qui peut fonctionner simultanément comme :



Configuration du Mode

Le mode de fonctionnement est **déterminé par le plan de contrôle** (SMF, PGW-C ou SGW-C) qui établit des associations PFCP avec OmniUPF. Aucune configuration spécifique d'OmniUPF n'est requise pour passer d'un mode à l'autre.

Fonctionnement Simultané :

- OmniUPF peut accepter des associations PFCP de plusieurs plans de contrôle simultanément
- Une seule instance d'OmniUPF peut agir comme UPF, PGW-U et SGW-U **en même temps**
- Les sessions provenant de différents plans de contrôle sont isolées et gérées indépendamment

---

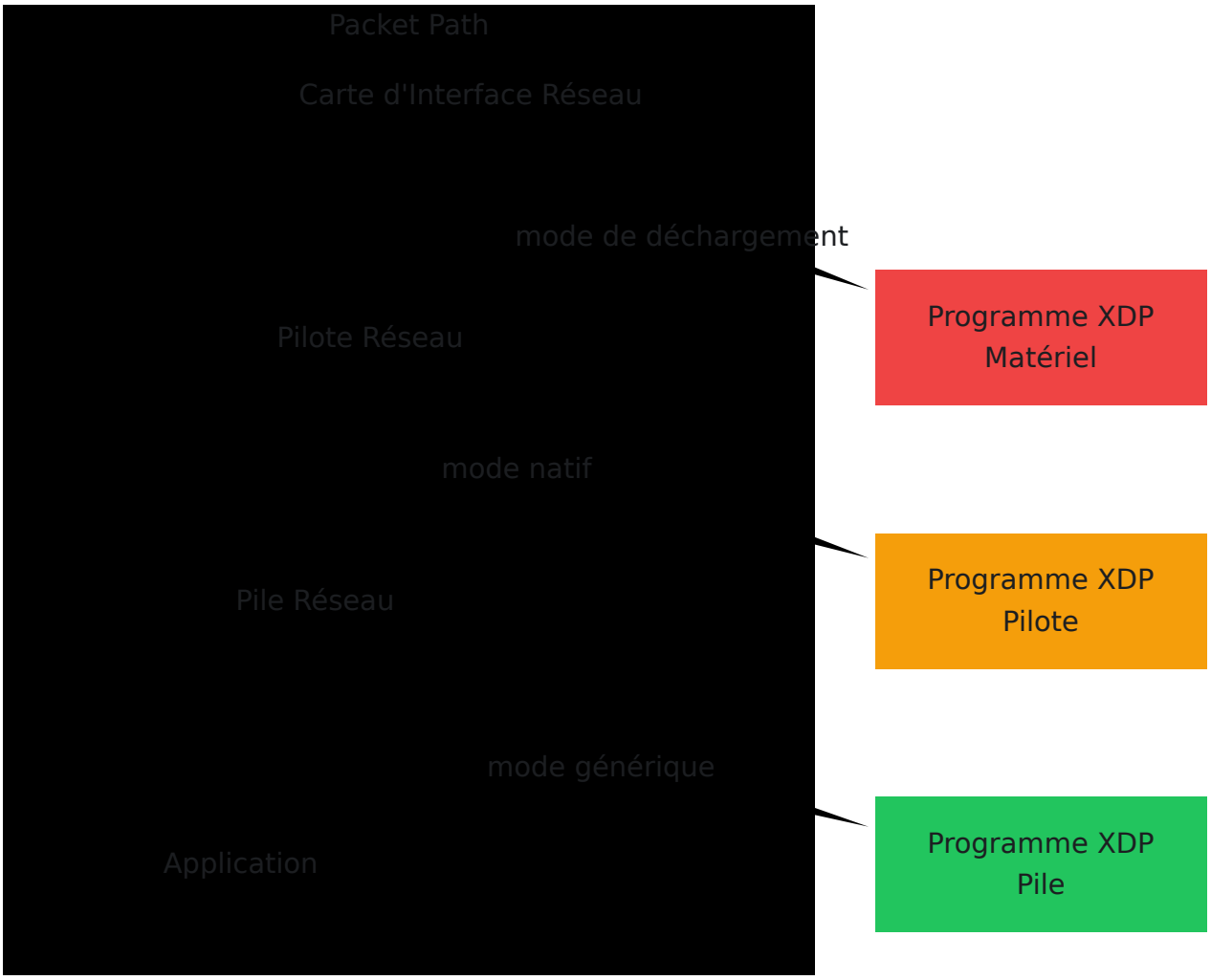
Modes de Rattachement XDP

OmniUPF utilise XDP (eXpress Data Path) pour un traitement des paquets haute performance. Trois modes de rattachement sont pris en charge.

Pour des instructions détaillées sur la configuration de XDP, en particulier pour Proxmox et d'autres hyperviseurs, voir le Guide des Modes XDP.

Comparaison des Modes

Mode	Point de Rattachement	Performance	Cas d'Utilisation	E
Générique	Pile réseau (noyau)	~1-2 Mpps	Test, développement, compatibilité	N'i que
Natif	Pilote réseau (noyau)	~5-10 Mpps	Production (bare metal, VM avec SR-IOV)	Pilc cor XD
Déchargement	Matériel NIC (SmartNIC)	~10-40 Mpps	Production à haut débit	Sm ave déc XD



Mode Générique (Par Défaut)

Description : Le programme XDP s'exécute dans la pile réseau du noyau

Avantages :

- Fonctionne avec **n'importe** quelle interface réseau
- Pas d'exigences particulières en matière de pilote ou de matériel
- Idéal pour les tests et le développement
- Compatible avec tous les hyperviseurs et plateformes de virtualisation

Inconvénients :

- Performance inférieure (~1-2 Mpps par cœur)
- Les paquets ont déjà été traités par le pilote avant le traitement XDP

Configuration (dans `runtime.exs`) :

```
xdp_attach_mode = "generic"
```

Idéal pour :

- Machines virtuelles sans SR-IOV
- Environnements de test et de validation
- NIC sans support de pilote XDP
- Hyperviseurs comme Proxmox, VMware, VirtualBox

Mode Natif (Recommandé)

Description : Le programme XDP s'exécute au niveau du pilote réseau

Avantages :

- Haute performance (~5-10 Mpps par cœur)
- Paquets traités avant d'entrer dans la pile réseau
- Latence significativement inférieure à celle du mode générique
- Fonctionne sur bare metal et VMs avec SR-IOV

Inconvénients :

- Nécessite un pilote réseau avec support XDP
- Tous les NIC/pilotes ne supportent pas XDP natif

Configuration (dans `runtime.exs`) :

```
xdp_attach_mode = "native"
```

Idéal pour :

- Déploiements de production sur bare metal
- VMs avec passage SR-IOV

- NIC avec pilotes compatibles XDP (Intel, Mellanox, etc.)

Exigences :

- Pilote réseau compatible XDP (voir Compatibilité NIC)
- Noyau Linux 5.15+ avec support XDP activé

Mode Déchargement (Performance Maximale)

Description : Le programme XDP s'exécute directement sur le matériel SmartNIC

Avantages :

- Performance maximale (~10-40 Mpps)
- Aucuns frais généraux CPU pour le traitement des paquets
- Latence sub-microseconde
- Libère le CPU pour le traitement du plan de contrôle

Inconvénients :

- Nécessite un matériel SmartNIC coûteux
- Disponibilité limitée des SmartNIC
- Configuration et mise en place complexes

Configuration (dans `runtime.exs`) :

```
xdp_attach_mode = "offload"
```

Idéal pour :

- Déploiements de production à ultra-haut débit
- Informatique en périphérie avec des exigences strictes en matière de latence
- Environnements où les ressources CPU sont limitées

Exigences :

- SmartNIC avec support de déchargement XDP (Netronome Agilio CX, Mellanox BlueField)
- Firmware et pilotes spécialisés

Paramètres de Configuration

Interfaces Réseau

Paramètre	Description	Type	Par Défaut
`xdp_interfaces`	Interfaces réseau pour le trafic N3/N6/N9 (séparées par des virgules, ou `"auto"` pour toutes les non-boucle)	Chaîne	`"auto"`
`n3_address`	Adresse IPv4 pour l'interface N3 (GTP-U depuis RAN)	IP	`"127.0.0.1"`
`n9_address`	Adresse IPv4 pour l'interface N9 (UPF vers UPF pour ULCL)	IP	Identique à `n3_address`

Exemple (dans `runtime.exs`) :

```
xdp_interfaces = "eth0,eth1"
n3_address = "10.100.50.233"
n9_address = "10.100.50.234"
```

Configuration PFCP

Paramètre	Description	Type	Par Défaut
`pfcp_address`	Adresse locale pour le serveur PFCP (interface N4/Sxb/Sxc)	Chaîne IP	`"127.0.0.1"`
`pfcp_port`	Port PFCP	Entier	`8805`
`node_id`	ID de nœud local pour le protocole PFCP	Chaîne IP	`"127.0.0.1"`
`heartbeat_interval_ms`	Intervalle de battement PFCP (millisecondes)	Entier	`5000`
`heartbeat_timeout_ms`	Délai d'attente de battement PFCP (millisecondes)	Entier	`5000`
`heartbeat_retries`	Nombre de tentatives de battement avant de déclarer le pair mort	Entier	`3`

Exemple (dans `runtime.exs`) :

```
pfcp_address = "10.100.50.241"
pfcp_port = 8805
node_id = "10.100.50.241"
heartbeat_interval_ms = 10_000
heartbeat_retries = 5
```

API et Surveillance

Paramètre	Description	Type	Par Défaut
`api_port`	Port local pour le serveur API REST (Phoenix)	Entier	`8080`
`log_level`	Niveau de journalisation (`:debug`, `:info`, `:warning`, `:error`)	Atome	`:info`

Exemple (dans `runtime.exs`) :

```
api_port = 8080
log_level = :debug
```

Gestion du Chemin GTP

Paramètre	Description	Type	Par Défaut
`gtpu_port`	Port GTP-U	Entier	`2152`
`gtp_echo_interval`	Intervalle d'écho par défaut en secondes	Entier	`10`
`gtp_echo_retries`	Max d'échos manqués avant échec de chemin	Entier	`3`
`gtp_peers`	Liste des pairs GTP pour les keepalives de demande d'écho	Liste	`[]`

Exemple (dans `runtime.exs`) :

```
gtp_echo_interval = 15
gtp_echo_retries = 3
gtp_peers = [
  %{address: parse_ip.("10.100.50.50"), echo: true, echo_interval:
10},
  %{address: parse_ip.("10.100.50.60"), echo: false},
]
```

Capacité de la Carte eBPF

Paramètre	Description	Type	Par Défaut
`max_sessions`	Nombre maximum de sessions concurrentes	Entier	`1_000_000`
`far_map_size`	Taille de la carte eBPF FAR	Entier	`131_070`
`qer_map_size`	Taille de la carte eBPF QER	Entier	`65_535`
`urr_map_size`	Taille de la carte eBPF URR	Entier	`65_535`

Exemple (dans `runtime.exs`) :

```
max_sessions = 100_000
far_map_size = 131_070
qer_map_size = 65_535
urr_map_size = 131_070
```

Configuration du Tampon

Paramètre	Description	Type	Par Défaut
`buffer_port`	Port UDP pour les paquets tamponnés provenant de eBPF	Entier	`22152`

Exemple (dans `runtime.exs`) :

```
buffer_port = 22152
```

Drapeaux de Fonctionnalité

Paramètre	Description	Type	Par Défaut
`feature_ueip`	Activer l'allocation d'IP UE par OmniUPF	Booléen	`false`
`ueip_pool`	Pool d'IP pour l'allocation d'IP UE (nécessite `feature_ueip`)	Chaîne CIDR	`"10.60.0.0/24"`
`feature_ftup`	Activer l'allocation de F-TEID par OmniUPF	Booléen	`true`
`teid_pool_start`	Début de la plage d'allocation TEID	Entier	`1`
`teid_pool_end`	Fin de la plage d'allocation TEID	Entier	`10_000_000`

Exemple (allocation IP UE) (dans `runtime.exs`) :

```
feature_ueip = true
ueip_pool = "10.45.0.0/16"
```

Exemple (allocation F-TEID) (dans `runtime.exs`) :

```
feature_ftup = true
teid_pool_start = 1
teid_pool_end = 1_000_000
```

Configuration du Gestionnaire de Routes

Pour la synchronisation des routes UE avec le démon FRR (Free Range Routing). Voir le Guide de Gestion des Routes pour plus de détails.

Paramètre	Description	Type	Par Défaut
`route_manager_enabled`	Activer la synchronisation automatique des routes UE	Booléen	`true`
`route_manager_type`	Type de démon de routage (`"frr"` ou `"static"`)	Chaîne	`"frr"`

Exemple (dans `runtime.exs`) :

```
route_manager_enabled = true
route_manager_type = "frr"
```

Quand Activer :

- Déploiements Multi-UPF nécessitant une annonce de route
- Intégration avec les protocoles de routage OSPF ou BGP

- Nécessite le démon FRRouting installé et configuré

Configuration eBPF / XDP

Paramètre	Description	Type	Par Défaut
`xdp_interfaces`	Liste séparée par des virgules des interfaces pour XDP, ou `"auto"` pour toutes les non-boucle	Chaîne	`"auto"`
`xdp_attach_mode`	Mode XDP : `"generic"`, `"native"` ou `"offload"`	Chaîne	`"generic"`
`ebpf_pin_path`	Chemin de pin du système de fichiers BPF	Chaîne	`"/sys/fs/bpf/upf_pipeline"`
`xdp_obj_path`	Chemin vers l'objet eBPF compilé	Chaîne	`"/etc/omniupf/ipentrypoint_b`

Exemple (dans `runtime.exs`) :

```
xdp_interfaces = "auto"              # ou "eth0,eth1" pour des
interfaces spécifiques
xdp_attach_mode = "native"
ebpf_pin_path = "/sys/fs/bpf/upf_pipeline"
xdp_obj_path = "/etc/omniupf/ipentrypoint_bpf.o"
```

Fichier de Configuration

Fichier de Configuration Elixir (runtime.exs)

Fichier : `/etc/omniupf/runtime.exs`

Le fichier de configuration utilise la syntaxe Elixir avec des affectations de variables simples pour la lisibilité. Les variables sont appliquées à la configuration de l'application en bas du fichier via `config :upf_ex, ...`.

```
import Config

parse_ip = fn str ->
  {:ok, addr} = :inet.parse_address(String.to_charlist(str))
  addr
end

#
============================================================================
# Configuration PFCP (N4/Sx)
#
============================================================================
pfcp_address = "10.100.50.241"       # Adresse IP pour écouter les me
PFCP
pfcp_port = 8805                      # Port PFCP (standard : 8805)
node_id = "10.100.50.241"            # ID de nœud annoncé dans la
configuration d'association

#
============================================================================
# Configuration du Plan de Données GTP-U
#
============================================================================
n3_address = "10.100.50.233"         # IP de l'interface N3 (GTP-U ve
n9_address = n3_address               # IP de l'interface N9 (par déf
gtpu_port = 2152                      # Port GTP-U (standard : 2152)
buffer_port = 22152                   # Port d'écoute du tampon

#
============================================================================
# Configuration eBPF / XDP
#
============================================================================
xdp_interfaces = "auto"              # "auto" pour toutes les non-bou
liste séparée par des virgules
xdp_attach_mode = "native"           # Mode XDP : "generic", "native"
"offload"
ebpf_pin_path = "/sys/fs/bpf/upf_pipeline"
xdp_obj_path = "/etc/omniupf/ipentrypoint_bpf.o"

#
============================================================================
# Configuration des Sessions & Pool de Ressources
```

```
#
========================================================================
max_sessions = 100_000
teid_pool_start = 1
teid_pool_end = 10_000_000
far_map_size = 131_070
qer_map_size = 65_535
urr_map_size = 65_535

#
========================================================================
# Drapeaux de Fonctionnalité
#
========================================================================
feature_ueip = true
feature_ftup = true
ueip_pool = "10.45.0.0/16"

#
========================================================================
# Gestion des Routes
#
========================================================================
route_manager_enabled = true
route_manager_type = "frr"

#
========================================================================
# Configuration du Battement
#
========================================================================
heartbeat_interval_ms = 10_000
heartbeat_timeout_ms = 5_000
heartbeat_retries = 5

#
========================================================================
# Surveillance des Échos de Pairs GTP-U
#
========================================================================
gtp_echo_interval = 10
gtp_echo_retries = 3
gtp_peers = [
  %{address: parse_ip.("10.100.50.50"), echo: true, echo_interval: 10
```

```
]

#
================================================================================
# API HTTP et Journalisation
#
================================================================================
api_port = 8080
log_level = :info

#
================================================================================
# Appliquer la Configuration (ne pas modifier en dessous de cette lig
#
================================================================================
config :upf_ex,
  pfcp_address: parse_ip.(pfcp_address),
  pfcp_port: pfcp_port,
  n3_address: parse_ip.(n3_address),
  n9_address: parse_ip.(n9_address),
  node_id: parse_ip.(node_id),
  api_port: api_port,
  ebpf_pin_path: ebpf_pin_path,
  xdp_obj_path: xdp_obj_path,
  interface_names: String.split(xdp_interfaces, ","),
  xdp_attach_mode: xdp_attach_mode,
  feature_ueip: feature_ueip,
  feature_ftup: feature_ftup,
  ueip_pool: ueip_pool,
  teid_pool_start: teid_pool_start,
  teid_pool_end: teid_pool_end,
  far_map_size: far_map_size,
  qer_map_size: qer_map_size,
  urr_map_size: urr_map_size,
  max_sessions: max_sessions,
  route_manager_enabled: route_manager_enabled,
  route_manager_type: route_manager_type,
  buffer_port: buffer_port,
  gtpu_port: gtpu_port,
  heartbeat_interval_ms: heartbeat_interval_ms,
  heartbeat_timeout_ms: heartbeat_timeout_ms,
  heartbeat_retries: heartbeat_retries,
  gtp_echo_interval: gtp_echo_interval,
  gtp_echo_retries: gtp_echo_retries,
```

```
  gtp_peers: gtp_peers

config :logger, level: log_level
```

Gestion du Service

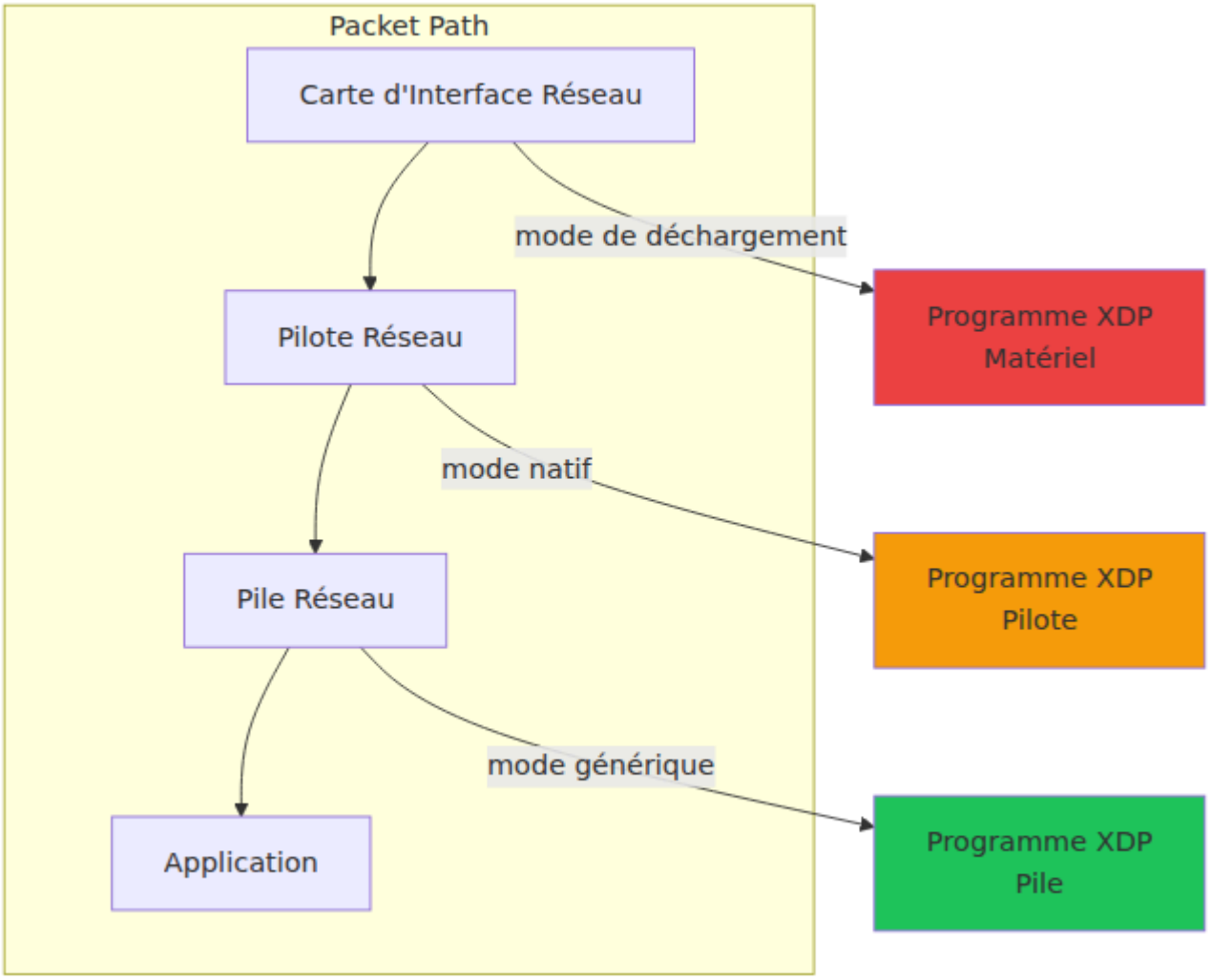
```
# Démarrer le UPF
sudo systemctl start omniupf

# Arrêter le UPF
sudo systemctl stop omniupf

# Redémarrer après des modifications de configuration
sudo systemctl restart omniupf

# Vérifier l'état
sudo systemctl status omniupf

# Voir les journaux
sudo journalctl -u omniupf -f

# Ou utiliser directement le binaire de release
sudo /opt/omniupf/bin/upf_ex start
sudo /opt/omniupf/bin/upf_ex stop
sudo /opt/omniupf/bin/upf_ex daemon   # démarrer en tant que démon
en arrière-plan
```

Compatibilité Hyperviseur

Aperçu

OmniUPF est compatible avec tous les principaux hyperviseurs et plateformes de virtualisation. Le mode de rattachement XDP et la configuration réseau dépendent des capacités de mise en réseau de l'hyperviseur.

Pour des instructions étape par étape sur l'activation de XDP natif sur Proxmox et d'autres hyperviseurs, voir le Guide des Modes XDP.



Proxmox VE

Configurations Supportées :

1. Mode Pont (XDP Générique)

Cas d'utilisation : Réseau VM standard

Configuration :

- Dispositif Réseau : VirtIO ou E1000
- Mode XDP : `generic`
- Performance : ~1-2 Mpps

Paramètres VM Proxmox :

```
Dispositif Réseau : net0
Modèle : VirtIO (paravirtualisé)
Pont : vmbr0
```

Configuration OmniUPF (dans `runtime.exs`) :

```
xdp_interfaces = "eth0"
xdp_attach_mode = "generic"
```

---

2. Passage SR-IOV (XDP Natif)

Cas d'utilisation : Production haute performance

Configuration :

- Dispositif Réseau : Fonction Virtuelle SR-IOV
- Mode XDP : `native`
- Performance : ~5-10 Mpps

Exigences :

- NIC physique avec support SR-IOV (Intel X710, Mellanox ConnectX-5)
- SR-IOV activé dans le BIOS
- IOMMU activé (`intel_iommu=on` ou `amd_iommu=on` dans GRUB)

Activer SR-IOV sur Proxmox :

```
# Modifier la configuration GRUB
nano /etc/default/grub

# Ajouter à GRUB_CMDLINE_LINUX_DEFAULT :
intel_iommu=on iommu=pt

# Mettre à jour GRUB et redémarrer
update-grub
reboot

# Activer les VFs sur le NIC (exemple : 4 fonctions virtuelles sur
eth0)
echo 4 > /sys/class/net/eth0/device/sriov_numvfs

# Rendre persistant
echo "echo 4 > /sys/class/net/eth0/device/sriov_numvfs" >>
/etc/rc.local
chmod +x /etc/rc.local
```

Paramètres VM Proxmox :

```
Matériel -> Ajouter -> Dispositif PCI
Sélectionner : Fonction Virtuelle SR-IOV
Toutes les Fonctions : Non
GPU Principal : Non
PCI-Express : Oui (optionnel)
```

Configuration OmniUPF (dans `runtime.exs`) :

```
xdp_interfaces = "ens1f0"    # Nom VF SR-IOV
xdp_attach_mode = "native"
```

---

3. Passage PCI (XDP Natif)

Cas d'utilisation : NIC dédié pour une seule VM

Configuration :

- Entièrement NIC physique passé à la VM
- Mode XDP : `native` ou `offload` (si SmartNIC)
- Performance : ~5-40 Mpps (dépend du NIC)

Paramètres VM Proxmox :

```
Matériel -> Ajouter -> Dispositif PCI
Sélectionner : NIC Physique (ex : 0000:01:00.0)
Toutes les Fonctions : Oui
GPU Principal : Non
PCI-Express : Oui
```

Configuration OmniUPF (dans `runtime.exs`) :

```
xdp_interfaces = "ens1f0"
xdp_attach_mode = "native"    # ou "offload" pour SmartNIC
```

KVM/QEMU

Mode Pont :

```
virt-install \
  --name omniupf \
  --network bridge=br0,model=virtio \
  --disk path=/var/lib/libvirt/images/omniupf.qcow2 \
  ...
```

Passage SR-IOV :

```
<interface type='hostdev' managed='yes'>
  <source>
    <address type='pci' domain='0x0000' bus='0x01' slot='0x10'
function='0x1'/>
  </source>
</interface>
```

VMware ESXi

vSwitch Standard (XDP Générique) :

- Adaptateur Réseau : VMXNET3
- Mode XDP : `generic`

SR-IOV (XDP Natif) :

- Activer SR-IOV dans les paramètres de l'hôte ESXi
- Ajouter un adaptateur réseau SR-IOV à la VM
- Mode XDP : `native`

Microsoft Hyper-V

Commutateur Virtuel (XDP Générique) :

- Adaptateur Réseau : Synthétique
- Mode XDP : `generic`

SR-IOV (XDP Natif) :

- Activer SR-IOV dans Hyper-V Manager
- Configurer SR-IOV sur l'adaptateur réseau virtuel
- Mode XDP : `native`

VirtualBox

Mode NAT/Pont (XDP Générique uniquement) :

- Adaptateur Réseau : VirtIO-Net ou Intel PRO/1000
- Mode XDP : `generic`
- Remarque : VirtualBox ne prend **pas** en charge SR-IOV

Compatibilité NIC

Comprendre Mpps vs Débit

Paquets par seconde (Mpps) et débit (Gbps) ne sont pas directement équivalents - la relation dépend entièrement de la taille des paquets. Le trafic des réseaux mobiles varie considérablement en taille de paquet, des petits paquets VoIP aux grands trames de streaming vidéo.

Impact de la Taille des Paquets sur le Débit

Dans les réseaux mobiles, le UPF traite des paquets encapsulés GTP-U sur l'interface N3 et des paquets IP natifs sur l'interface N6.

Frais GTP-U d'Encapsulation (Interface N3) :

- **En-tête IPv4 externe** : 20 octets
- **En-tête UDP externe** : 8 octets
- **En-tête GTP-U** : 8 octets
- **Total des frais GTP-U** : 36 octets

Paquet GTP-U Minimum (N3) :

- **En-tête IP interne** : 20 octets (IPv4)
- **En-tête UDP interne** : 8 octets
- **Charge utile minimum** : 1 octet
- **Total du paquet interne** : 29 octets
- **Plus les frais GTP-U** : 36 octets
- **Taille totale du paquet** : 65 octets

Débit à 1 Mpps avec des paquets GTP-U minimum :

```
65 octets x 1 000 000 pps x 8 bits/octet = 520 Mbps
```

Paquet GTP-U Maximum (N3 avec MTU de 1500) :

- **MTU IP interne** : 1500 octets (paquet IP interne complet)

- **Plus les frais GTP-U** : 36 octets
- **Taille totale du paquet** : 1536 octets

Débit à 1 Mpps avec des paquets GTP-U maximum :

```
1536 octets x 1 000 000 pps x 8 bits/octet = 12 288 Mbps ~ 12,3 Gbps
```

Paquets IP Natifs (Interface N6) :

Sur N6 (vers Internet), les paquets sont des IP natifs sans GTP-U :

Paquet N6 Minimum :

- **En-tête IP** : 20 octets
- **En-tête UDP** : 8 octets
- **Charge utile minimum** : 1 octet
- **Total** : 29 octets

Débit à 1 Mpps avec des paquets N6 minimum :

```
29 octets x 1 000 000 pps x 8 bits/octet = 232 Mbps
```

Paquet N6 Maximum (MTU de 1500) :

- **MTU IP** : 1500 octets
- **Total** : 1500 octets

Débit à 1 Mpps avec des paquets N6 maximum :

```
1500 octets x 1 000 000 pps x 8 bits/octet = 12 000 Mbps = 12 Gbps
```

Exemples de Performance Réelle

NIC Intel X710 (capacité de 10 Mpps sur l'interface N3 avec GTP-U) :

Modèle de Trafic	Taille de Paquet Interne	Total GTP-U	Débit à 10 Mpps	Cas d'Utilisation Typique
Appels VoIP (N3)	65-150 octets	101-186 octets	**0,8-1,5 Gbps**	Voix AMR-WB, G.711
Web léger (N3)	400-600 octets	436-636 octets	**3,5-5,1 Gbps**	HTTP/HTTPS, messagerie
Mobile moderne (N3)	**1200 octets**	**1236 octets**	**9,9 Gbps**	**Mélange de trafic typique 2024**
Streaming vidéo (N3)	1400-1450 octets	1436-1486 octets	**11,5-11,9 Gbps**	Morceaux vidéo HD/4K
MTU Maximum (N3)	1500 octets	1536 octets	**12,3 Gbps**	Téléchargements TCP volumineux

Sur l'interface N6 (IP natif, pas de GTP-U) :

Modèle de Trafic	Taille de Paquet	Débit à 10 Mpps	Cas d'Utilisation Typique
Paquets VoIP	65-150 octets	**0,5-1,2 Gbps**	Flux RTP de voix
Web léger	400-600 octets	**3,2-4,8 Gbps**	Requêtes HTTP
Mobile moderne	**1200 octets**	**9,6 Gbps**	**Trafic typique 2024**
Streaming vidéo	1400-1450 octets	**11,2-11,6 Gbps**	Téléchargements vidéo
MTU Maximum	1500 octets	**12,0 Gbps**	Transferts de fichiers volumineux

À 10 Mpps avec un trafic mobile moderne (taille de paquet moyenne de 1200 octets), attendez-vous à un **débit d'environ 10 Gbps** sur les interfaces N3 et N6.

Planification de Capacité Pratique :

Avec une taille de paquet moyenne de 1200 octets (typique pour les réseaux mobiles modernes avec streaming vidéo) :

Capacité Mpps NIC	Débit N3 (GTP-U)	Débit N6 (IP Natif)	Scénario de Déploiement Réaliste
1 Mpps	~1,0 Gbps	~1,0 Gbps	Site de petite cellule, passerelle IoT
5 Mpps	~4,9 Gbps	~4,8 Gbps	Site de cellule moyen, entreprise
10 Mpps	~9,9 Gbps	~9,6 Gbps	Site de grande cellule, petite ville
20 Mpps	~19,7 Gbps	~19,2 Gbps	Zone métropolitaine, ville moyenne
40 Mpps	~39,4 Gbps	~38,4 Gbps	Grande métropole, hub régional

Pilotes Réseau Compatibles XDP

OmniUPF nécessite des pilotes réseau avec support XDP pour les modes **natif** et **déchargement**. Le mode générique fonctionne avec **n'importe quel** NIC.

NIC Intel

Modèle	Pilote	Support XDP	Mode	Performance
Intel X710	i40e	Oui	Natif	~10 Mpps
Intel XL710	i40e	Oui	Natif	~10 Mpps
Intel E810	ice	Oui	Natif	~15 Mpps
Intel 82599ES	ixgbe	Oui	Natif	~8 Mpps
Intel I350	igb	Limité	Générique	~1 Mpps
Intel E1000	e1000	Non	Générique uniquement	~1 Mpps

NIC Mellanox/NVIDIA

Modèle	Pilote	Support XDP	Mode	Performance
Mellanox ConnectX-5	mlx5	Oui	Natif	~12 Mpps
Mellanox ConnectX-6	mlx5	Oui	Natif	~20 Mpps
Mellanox BlueField	mlx5	Oui	Natif + Déchargement	~40 Mpps
Mellanox ConnectX-4	mlx4	Limité	Générique	~2 Mpps

NIC Broadcom

Modèle	Pilote	Support XDP	Mode	Performance
Broadcom BCM57xxx	bnxt_en	Oui	Natif	~8 Mpps
Broadcom NetXtreme II	bnx2x	Non	Générique uniquement	~1 Mpps

Autres Fabricants

Modèle	Pilote	Support XDP	Mode	Performance
Netronome Agilio CX	nfp	Oui	Déchargement	~30 Mpps
Amazon ENA	ena	Oui	Natif	~5 Mpps
Solarflare SFC9xxx	sfc	Oui	Natif	~8 Mpps
VirtIO	virtio_net	Limité	Générique	~2 Mpps

Vérification du Support XDP du NIC

Vérifiez si le pilote prend en charge XDP :

```
# Trouver le pilote NIC
ethtool -i eth0 | grep driver

# Vérifier le support XDP dans le pilote
modinfo <driver_name> | grep -i xdp

# Exemple pour Intel i40e
modinfo i40e | grep -i xdp
```

Vérifiez l'attachement du programme XDP :

```
# Vérifiez si le programme XDP est attaché
ip link show eth0 | grep -i xdp

# Sortie d'exemple (XDP attaché) :
# 2: eth0: <BROADCAST,MULTICAST,UP,LOWER_UP> mtu 1500 xdp qdisc mq
```

NIC Recommandés par Cas d'Utilisation

Avec une taille de paquet moyenne de 1200 octets (trafic mobile moderne) :

Cas d'Utilisation	NIC Recommandé	Mode	Capacité Mpps
Test/Développement	N'importe quel NIC (VirtIO, E1000)	Générique	1-2 Mpps
Site de Petite Cellule	Intel X710, Mellanox CX-5	Natif	5-10 Mpps
Cellule Moyenne/Métropolitaine	Intel E810, Mellanox CX-6	Natif	10-20 Mpps
Grande Métropole	Mellanox CX-6, Intel E810 (double)	Natif	20-40 Mpps
Hub Régional	Mellanox BlueField, Netronome Agilio	Déchargement	40+ Mpps
VM Proxmox (Pont)	VirtIO	Générique	1-2 Mpps
VM Proxmox (SR-IOV)	Intel X710/E810 VF, Mellanox CX-5 VF	Natif	5-10 Mpps

---

Ressources Supplémentaires

Documentation Officielle XDP :

- Projet XDP

- Documentation XDP du Noyau

Listes de Compatibilité NIC :

- Liste de Support XDP de Cilium
- Pilotes XDP de IO Visor

Exemples de Configuration

Exemple 1 : Environnement de Développement (Mode Générique)

Scénario : Tester OmniUPF sur un ordinateur portable ou une VM sans SR-IOV

```
# Configuration de développement (/etc/omniupf/runtime.exs)
xdp_interfaces = "eth0"
xdp_attach_mode = "generic"
api_port = 8080
pfcp_address = "127.0.0.1"
pfcp_port = 8805
node_id = "127.0.0.1"
n3_address = "127.0.0.1"
log_level = :debug
max_sessions = 1_000
```

Exemple 2 : Production Bare Metal (Mode Natif)

Scénario : UPF de production sur serveur bare metal avec NIC Intel X710

```
# Configuration bare metal de production
(/etc/omniupf/runtime.exs)
xdp_interfaces = "ens1f0,ens1f1"    # N3 sur ens1f0, N6 sur ens1f1
xdp_attach_mode = "native"
api_port = 8080
pfcp_address = "10.100.50.241"
pfcp_port = 8805
node_id = "10.100.50.241"
n3_address = "10.100.50.233"
n9_address = "10.100.50.234"
log_level = :info
max_sessions = 500_000
gtp_echo_interval = 30
gtp_peers = [
  %{address: parse_ip.("10.100.50.10"), echo: true, echo_interval:
30},
  %{address: parse_ip.("10.100.50.11"), echo: true, echo_interval:
30},
]
heartbeat_interval_ms = 10_000
feature_ueip = true
ueip_pool = "10.45.0.0/16"
```

Exemple 3 : VM Proxmox avec SR-IOV (Mode Natif)

Scénario : UPF de production sur VM Proxmox avec passage SR-IOV

```
# Configuration Proxmox SR-IOV (/etc/omniupf/runtime.exs)
xdp_interfaces = "ens1f0"           # VF SR-IOV
xdp_attach_mode = "native"
api_port = 8080
pfcp_address = "192.168.100.10"
pfcp_port = 8805
node_id = "192.168.100.10"
n3_address = "192.168.100.10"
log_level = :info
max_sessions = 100_000
gtp_echo_interval = 15
gtp_peers = [
  %{address: parse_ip.("192.168.100.50"), echo: true},
]
```

Exemple 4 : Mode PGW-U (EPC 4G)

Scénario : OmniUPF agissant comme PGW-U dans un réseau EPC 4G

```
# Configuration PGW-U (/etc/omniupf/runtime.exs)
xdp_interfaces = "eth0"
xdp_attach_mode = "native"
api_port = 8080
pfcp_address = "10.200.1.10"
pfcp_port = 8805
node_id = "10.200.1.10"
n3_address = "10.200.1.10"          # Interface S5/S8 (GTP-U)
log_level = :info
max_sessions = 200_000
gtp_echo_interval = 20
gtp_peers = [
  %{address: parse_ip.("10.200.1.50"), echo: true, echo_interval:
20},
]
heartbeat_interval_ms = 5_000
```

Exemple 5 : Multi-Mode (UPF + PGW-U Simultanément)

Scénario : OmniUPF servant à la fois les réseaux 5G et 4G simultanément

```
# Configuration multi-mode (/etc/omniupf/runtime.exs)
xdp_interfaces = "eth0,eth1"
xdp_attach_mode = "native"
api_port = 8080
pfcp_address = "10.50.1.100"
pfcp_port = 8805
node_id = "10.50.1.100"
n3_address = "10.50.1.100"
n9_address = "10.50.1.101"
log_level = :info
max_sessions = 300_000
gtp_echo_interval = 15
gtp_peers = [
  %{address: parse_ip.("10.50.2.10"), echo: true, echo_interval:
15},
  %{address: parse_ip.("10.50.2.20"), echo: true, echo_interval:
15},
]
heartbeat_interval_ms = 10_000
feature_ueip = true
ueip_pool = "10.60.0.0/16"
```

Exemple 6 : Mode Déchargement SmartNIC

Scénario : Déploiement à ultra-haut débit avec SmartNIC Netronome Agilio CX

```
# Configuration SmartNIC déchargement (/etc/omniupf/runtime.exs)
xdp_interfaces = "enp1s0np0"        # Interface SmartNIC
xdp_attach_mode = "offload"
api_port = 8080
pfcp_address = "10.10.1.50"
pfcp_port = 8805
node_id = "10.10.1.50"
n3_address = "10.10.1.50"
log_level = :warning
max_sessions = 1_000_000
far_map_size = 2_000_000
qer_map_size = 1_000_000
gtp_echo_interval = 30
gtp_peers = [
  %{address: parse_ip.("10.10.2.10"), echo: true},
  %{address: parse_ip.("10.10.2.20"), echo: true},
  %{address: parse_ip.("10.10.2.30"), echo: true},
]
heartbeat_interval_ms = 15_000
```

Dimensionnement de la Carte et Planification de Capacité

Définir les Tailles de Carte

Définissez `max_sessions` et configurez les tailles de carte pour votre déploiement :

```
max_sessions = 100_000
far_map_size = 131_070
qer_map_size = 65_535
urr_map_size = 131_070
```

Utilisation de la mémoire : ~91 Mo pour 100K sessions

Estimation de Capacité

Calculer le nombre maximum de sessions :

```
Max Sessions = min(
  pdr_map_size / 2,
  far_map_size / 2,
  qer_map_size
)
```

Exemple :

- Carte PDR : 200 000
- Carte FAR : 200 000
- Carte QER : 100 000

Max Sessions = min(100 000, 100 000, 100 000) = **100 000**

Exigences en Mémoire

Utilisation de mémoire par session :

- PDR : 2 x 212 B = 424 B
- FAR : 2 x 20 B = 40 B
- QER : 1 x 36 B = 36 B
- URR : 2 x 20 B = 40 B
- **Total** : ~540 B par session

Pour 100K sessions : ~52 Mo de mémoire noyau

Recommandation : Assurez-vous que la limite de mémoire verrouillée permet 2x l'utilisation estimée :

```
# Vérifier la limite actuelle
ulimit -l

# Définir illimité (nécessaire pour eBPF)
ulimit -l unlimited
```

Documentation Connexe

- **Guide d'Architecture** - Détails techniques eBPF/XDP et optimisation des performances
- **Guide de Gestion des Règles** - Configuration PDR, FAR, QER, URR
- **Guide de Surveillance** - Statistiques, surveillance de capacité et alertes
- **Référence des Métriques** - Référence complète des métriques Prometheus
- **Guide de l'Interface Web** - Opérations du panneau de contrôle
- **Guide des Opérations** - Aperçu de l'architecture et du déploiement du UPF
- **Guide du Jardin Clos** - Redirection hors crédit, portail captif et configuration de liste blanche

Référence des métriques

Ce document décrit toutes les métriques Prometheus exposées par OmniUPF sur le point de terminaison `/metrics`.

Catégories de métriques

1. **Métriques de messages PFCP** - Compteurs de messages de protocole de plan de contrôle et latence par pair
2. **Métriques d'action XDP** - Verdicts de paquets de plan de données (drop, pass, redirect, etc.)
3. **Métriques de paquets** - Compteurs de paquets reçus par type de protocole
4. **Métriques de session et d'association PFCP** - Comptes de sessions et d'associations par pair
5. **Métriques URR** - Compteurs de volume de trafic agrégés par pair PFCP
6. **Métriques de mise en mémoire tampon des paquets** - État, capacité et débit du tampon de paquets
7. **Métriques de rapport de données descendant (notification)** - Notifications de demande de rapport de session PFCP et suivi de l'index FAR
8. **Métriques de capacité de carte eBPF** - Utilisation et capacité de la carte eBPF

Référence des métriques

Métriques de messages PFCP

Métriques pour le suivi des messages de protocole PFCP entre le UPF et les nœuds de plan de contrôle.

Nom de la métrique	Type	Étiquettes	Description
upf_pfcp_rx	Compteur	`message_name`, `peer_address`	Nombre total de messages PFCP reçus par type de message et pair
upf_pfcp_tx	Compteur	`message_name`, `peer_address`	Nombre total de messages PFCP transmis par type de message et pair
upf_pfcp_rx_errors	Compteur	`message_name`, `cause_code`, `peer_address`	Nombre total de messages PFCP rejetés avec cause d'erreur par type de message et pair
upf_pfcp_rx_latency	Résumé	`message_type`, `peer_address`	Durée de traitement des messages PFCP en microsecondes (p50, p90, p99 quantiles) par type de message et pair

Remarque : Tous les compteurs suivent les messages par pair PFCP pour une visibilité granulaire sur le comportement des nœuds de plan de contrôle.

Métriques d'action XDP

Compteurs de paquets par action/verdict du programme XDP. Ces métriques suivent la décision du plan de données pour chaque paquet.

Nom de la métrique	Type	Étiquettes	Description
upf_xdp_aborted	Compteur	aucun	Nombre total de paquets abandonnés (XDP_ABORTED)
upf_xdp_drop	Compteur	aucun	Nombre total de paquets abandonnés (XDP_DROP)
upf_xdp_pass	Compteur	aucun	Nombre total de paquets passés au noyau (XDP_PASS)
upf_xdp_tx	Compteur	aucun	Nombre total de paquets transmis (XDP_TX)
upf_xdp_redirect	Compteur	aucun	Nombre total de paquets redirigés (XDP_REDIRECT)

Métriques de paquets

Compteurs pour les paquets reçus par type de protocole. Toutes les métriques utilisent l'étiquette `packet_type`.

Nom de la métrique	Type	Étiquettes	Description
upf_rx	Compteur	`packet_type`	Nombre total de paquets reçus par type
upf_route	Compteur	`packet_type`	Nombre total de paquets routés par résultat de recherche

Valeurs de packet_type upf_rx :

- `arp` - Paquets ARP
- `icmp` - Paquets ICMP
- `icmp6` - Paquets ICMPv6
- `ip4` - Paquets IPv4
- `ip6` - Paquets IPv6
- `tcp` - Paquets TCP
- `udp` - Paquets UDP
- `other` - Autres types de paquets
- `gtp-echo` - Demande/réponse d'écho GTP
- `gtp-pdu` - PDU GTP-U (données utilisateur encapsulées)
- `gtp-other` - Autres types de messages GTP
- `gtp-unexp` - Paquets GTP inattendus/malformés

Valeurs de packet_type upf_route :

- `ip4-cache` - Hits de cache de route IPv4
- `ip4-ok` - Succès de recherche FIB IPv4
- `ip4-error-drop` - Échec de recherche FIB IPv4, paquet abandonné
- `ip4-error-pass` - Échec de recherche FIB IPv4, paquet passé au noyau
- `ip6-cache` - Hits de cache de route IPv6
- `ip6-ok` - Succès de recherche FIB IPv6
- `ip6-error-drop` - Échec de recherche FIB IPv6, paquet abandonné
- `ip6-error-pass` - Échec de recherche FIB IPv6, paquet passé au noyau

Métriques de session et d'association PFCP

Métriques pour le suivi des sessions et des associations PFCP entre le UPF et les nœuds de plan de contrôle.

Nom de la métrique	Type	Étiquettes	Description
upf_pfcp_sessions	Gauge	aucun	Nombre total de sessions PFCP actuellement établies (tous les pairs)
upf_pfcp_associations	Gauge	aucun	Nombre total d'associations PFCP actuellement établies (tous les pairs)
upf_pfcp_association_status	Gauge	`node_id`, `address`	État de l'association PFCP par pair (1=up, 0=down)
upf_pfcp_sessions_per_node	Gauge	`node_id`, `address`	Nombre de sessions PFCP actives par nœud de plan de contrôle

Métriques URR (Règle de rapport d'utilisation)

Métriques de volume de trafic agrégées par pair PFCP. Le volume de chaque pair représente la somme de tous les compteurs URR à travers toutes les sessions de ce nœud de plan de contrôle.

Nom de la métrique	Type	Étiquettes	Description
upf_urr_uplink_volume_bytes	Gauge	`peer_address`	Volume total de trafic montant en octets pour toutes les sessions de ce pair
upf_urr_downlink_volume_bytes	Gauge	`peer_address`	Volume total de trafic descendant en octets pour toutes les sessions de ce pair
upf_urr_total_volume_bytes	Gauge	`peer_address`	Volume total de trafic en octets (montant + descendant) pour toutes les sessions de ce pair

Remarque : Les volumes sont agrégés par pair PFCP pour éviter des problèmes de haute cardinalité. Les statistiques URR individuelles sont disponibles via l'API REST à `/api/v1/urr_map`.

Métriques de mise en mémoire tampon des paquets

Métriques pour le suivi de l'état et des performances du tampon de paquets. Le UPF peut mettre en mémoire tampon les paquets descendants lorsqu'un UE est

en état d'inactivité, les maintenant jusqu'à ce que l'UE soit paginé et passe à l'état connecté.

Nom de la métrique	Type	Étiquettes
upf_buffer_packets_total	Compteur	aucun
upf_buffer_packets_dropped	Compteur	`reason`
upf_buffer_packets_flushed	Compteur	aucun
upf_buffer_packets_current	Gauge	aucun
upf_buffer_bytes_total	Compteur	aucun

Nom de la métrique	Type	Étiquettes
upf_buffer_bytes_current	Gauge	aucun
upf_buffer_fars_active	Gauge	aucun
upf_buffer_listener_packets_received_total	Compteur	aucun
upf_buffer_listener_packets_buffered_total	Compteur	aucun
upf_buffer_listener_errors_total	Compteur	`type`

Nom de la métrique	Type	Étiquettes
upf_buffer_listener_error_indications_sent_total	Compteur	`remote_peer`
upf_buffer_flush_success_total	Compteur	aucun
upf_buffer_flush_errors_total	Compteur	`reason`
upf_buffer_flush_packets_sent_total	Compteur	aucun

Nom de la métrique	Type	Étiquettes

Valeurs de raison upf_buffer_packets_dropped :

- `expired` - Paquets abandonnés en raison de l'expiration du TTL
- `global_limit` - Abandonné en raison de la limite totale de tampon atteinte
- `far_limit` - Abandonné en raison de la limite de tampon par FAR atteinte
- `cleared` - Paquets manuellement vidés du tampon

Valeurs de type upf_buffer_listener_errors_total :

- `read_error` - Erreur de lecture du socket de tampon
- `too_small` - Paquet trop petit pour l'en-tête GTP
- `invalid_gtp_type` - Type de message GTP non G-PDU
- `unknown_teid` - Aucun PDR/FAR trouvé pour le TEID
- `not_buffering_far` - FAR n'a pas d'action BUFF
- `truncated_ext` - En-têtes d'extension GTP tronqués
- `no_payload` - Le paquet GTP n'a pas de charge utile
- `buffer_full` - Capacité du tampon dépassée

Valeurs de raison upf_buffer_flush_errors_total :

- `far_lookup_failed` - Échec de la recherche d'informations FAR dans la carte eBPF
- `no_forw_action` - Le FAR n'a pas d'action FORW définie
- `connection_failed` - Échec de la création de la connexion UDP pour le vidage

Métriques de rapport de données descendant (notification)

Métriques pour les notifications de demande de rapport de session PFCP envoyées au plan de contrôle lorsque des paquets sont mis en mémoire

tampon. Ces notifications déclenchent le plan de contrôle pour paginer l'UE.

Nom de la métrique	Type	Étiquettes	D
upf_dldr_sent_total	Compteur	aucun	Nor not rap dor des (DL au
upf_dldr_send_errors	Compteur	aucun	Nor d'e l'er not rap dor des
upf_dldr_active_notifications	Gauge	aucun	Nor FAR not DLI (pa vid
upf_far_index_size	Gauge	aucun	Nor FAR dar pou not DLI
upf_far_index_registrations_total	Compteur	aucun	Nor d'e de Far

Nom de la métrique	Type	Étiquettes	I
upf_far_index_unregistrations_total	Compteur	aucun	Nor dés FAR
upf_buffer_notify_to_flush_duration_seconds	Histogram	`pfcp_peer`	Ten l'er not et l pac mé

upf_buffer_notify_to_flush_duration_seconds :

- Seaux d'histogramme : 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0, 30.0, 60.0 secondes
- Étiquette `pfcp_peer` : Adresse SMF/PGW-C (par exemple, `10.100.50.241`)
- Mesure la latence entre l'envoi de la notification par le UPF au SMF et la réponse du SMF avec la modification de session pour vider les paquets
- Utile pour surveiller la réactivité du plan de contrôle lors des transitions d'inactivité à connecté

Métriques d'indication d'erreur GTP-U

Métriques pour le suivi des messages d'indication d'erreur GTP-U envoyés et reçus. Les indications d'erreur sont envoyées lorsqu'un pair reçoit des paquets pour des TEIDs inconnus, indiquant des incohérences d'état de tunnel (souvent dues à des redémarrages de pair).

Nom de la métrique	Type	Ét
upf_buffer_listener_error_indications_sent_total	Compteur	`nod` `pee`
upf_buffer_listener_error_indications_received_total	Compteur	`nod` `pee`
upf_buffer_listener_error_indication_sessions_deleted_total	Compteur	`nod` `pee`

Définitions des étiquettes :

- `node_id` : ID de nœud PFCP de l'association (par exemple, `"pgw-u-1"`, `"smf-1"`). Défini sur `"unknown"` si aucune association PFCP n'existe pour ce pair.
- `peer_address` : Adresse IP du pair distant (par exemple, `"192.168.50.10"`)

Quand les indications d'erreur sont envoyées :

- Le UPF reçoit un paquet GTP-U pour un TEID qui n'existe pas (par exemple, après un redémarrage du UPF, session déjà supprimée)
- L'expéditeur (eNodeB, gNodeB, UPF en amont) transmet à un tunnel obsolète/supprimé
- Le UPF envoie une indication d'erreur pour informer l'expéditeur d'arrêter l'envoi

Quand les indications d'erreur sont reçues :

- Le UPF transmet un paquet GTP-U à un pair en aval (PGW-U, SGW-U, UPF) pour un TEID inconnu
- Le pair distant ne reconnaît pas le TEID de destination (par exemple, le pair a redémarré et a perdu l'état du tunnel)
- Le UPF supprime automatiquement les sessions affectées pour arrêter le transfert vers des tunnels morts

Cas d'utilisation :

- Détecter les redémarrages de pair (un taux élevé d'indications d'erreur indique une perte d'état)
- Identifier les incohérences de configuration (problèmes d'allocation de TEID)
- Surveiller la santé de la synchronisation des tunnels entre les éléments du réseau
- Alerter sur des suppressions de session inattendues

Exemples de requêtes PromQL :

```
# Taux d'indications d'erreur reçues par pair (par seconde)
rate(upf_buffer_listener_error_indications_received_total[5m])

# Nombre total de sessions supprimées en raison d'indications d'erreu
spécifique
upf_buffer_listener_error_indication_sessions_deleted_total{peer_addr

# Pairs envoyant des TEIDs inconnus à ce UPF
sum by (node_id, peer_address) (upf_buffer_listener_error_indications
```

Métriques de capacité de carte eBPF

Métriques pour le suivi de l'utilisation de la carte eBPF. Ces métriques aident à surveiller l'utilisation des ressources et à détecter d'éventuels problèmes de capacité.

Nom de la métrique	Type	Étiquettes	Description
upf_ebpf_map_capacity	Gauge	`map_name`	Capacité maximale de la carte eBPF
upf_ebpf_map_used	Gauge	`map_name`	Nombre actuel d'entrées dans la carte eBPF

Valeurs courantes de map_name :

- `pdr_map` - Carte de règles de détection de paquets
- `far_map` - Carte de règles d'action de transfert
- `qer_map` - Carte de règles d'application de QoS
- `session_map` - Carte de recherche de session
- `teid_map` - Mapping TEID à session
- `ue_ip_map` - Mapping adresse IP UE à session

Utilisation des métriques Prometheus

Accéder aux métriques

Les métriques sont exposées sur le point de terminaison `/metrics` à l'adresse spécifiée par `metrics_address` dans le fichier de configuration (par défaut `:9090`) :

```
# Voir les métriques brutes
curl http://localhost:9090/metrics

# Exemple de sortie
upf_pfcp_sessions 42
upf_pfcp_associations 2
upf_urr_total_volume_bytes{peer_address="10.100.50.241"}
1048576000
```

Configuration de Prometheus

Ajoutez la cible OmniUPF à votre `prometheus.yml` :

```yaml
scrape_configs:
  - job_name: 'omniupf'
    static_configs:
      - targets: ['localhost:9090']
```

Tableaux de bord Grafana

Importez les métriques dans Grafana pour la visualisation :

- Comptes et tendances des sessions
- Volume de trafic par pair PFCP
- Taux de traitement des paquets
- Utilisation du tampon

- Surveillance de la capacité de la carte eBPF

Documentation connexe

- **Guide de surveillance** - Surveillance des statistiques, planification de capacité et alertes
- **Guide de configuration** - Configurer `metrics_address` et d'autres options UPF
- **Guide de l'interface Web** - Voir les métriques dans la page des statistiques
- **Guide d'architecture** - Chemin de données eBPF et optimisation des performances
- **Guide de gestion des règles** - Comprendre les métriques PDR, FAR, QER, URR
- **Guide de dépannage** - Utiliser les métriques pour le diagnostic

Guide de Surveillance

Table des Matières

Aperçu

Une surveillance efficace d'OmniUPF est essentielle pour maintenir la qualité du service, prévenir l'épuisement des capacités et dépanner les problèmes de performance. OmniUPF fournit des métriques complètes en temps réel via son interface Web et son API REST.

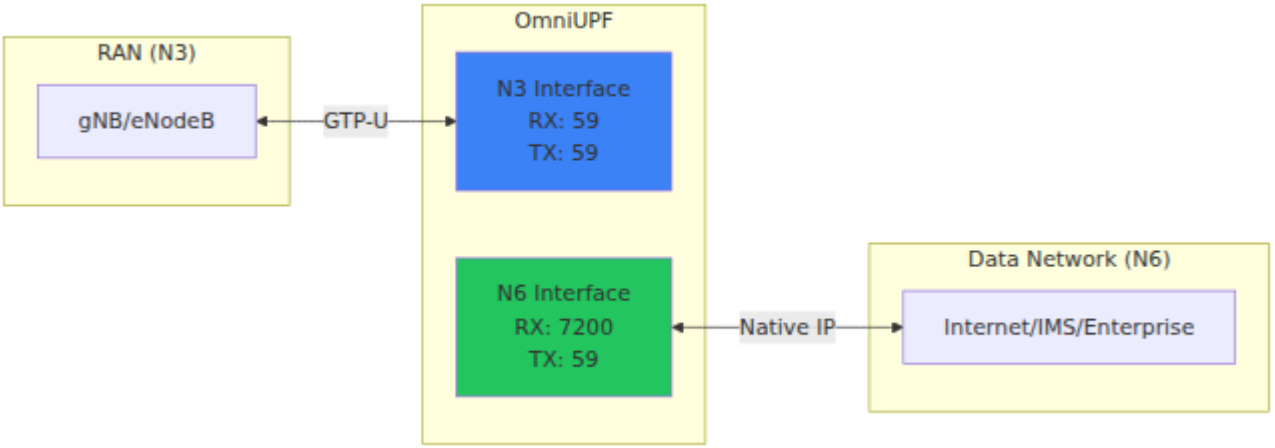
Catégories de Surveillance

Catégorie	Objectif	Fréquence de Mise à Jour	Métriques Clés
Statistiques de Paquets	Suivre les taux de traitement des paquets et les erreurs	Temps réel	Paquets RX/TX, pertes, répartition des protocoles
Statistiques d'Interface	Surveiller la distribution du trafic N3/N6	Temps réel	N3 RX/TX, N6 RX/TX
Statistiques XDP	Suivre la performance du chemin de données du noyau	Temps réel	XDP traités, passés, abandonnés, interrompus
Statistiques de Routage	Surveiller les décisions de routage des paquets	Temps réel	Recherches FIB, hits/misses de cache
Capacité de la Carte eBPF	Prévenir l'épuisement des ressources	Toutes les 10s	Pourcentages d'utilisation de la carte, utilisé vs. capacité
Statistiques de Tampon	Suivre la mise en tampon des paquets pendant la mobilité	Toutes les 5s	Paquets mis en tampon, âge du tampon, nombre de FAR

Surveillance des Statistiques

Statistiques d'Interface N3/N6

Les statistiques d'interface N3/N6 fournissent une visibilité sur la distribution du trafic entre le RAN (N3) et le Réseau de Données (N6).



Métriques :

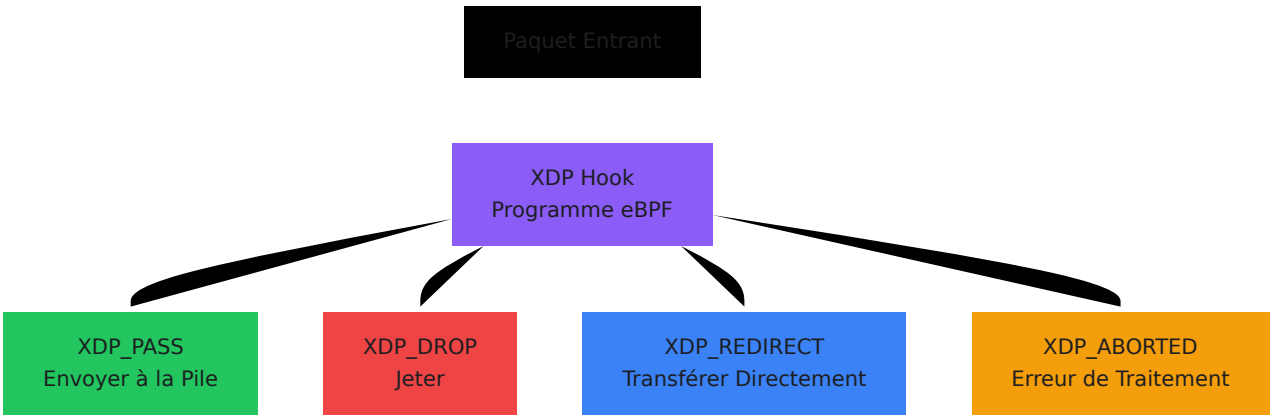
- **RX N3** : Paquets reçus du RAN (trafic GTP-U montant)
- **TX N3** : Paquets transmis au RAN (trafic GTP-U descendant)
- **RX N6** : Paquets reçus du Réseau de Données (IP native descendante)
- **TX N6** : Paquets transmis au Réseau de Données (IP native montante)
- **Total** : Compte agrégé des paquets sur toutes les interfaces

Comportement Attendu :

- **RX N3 ≈ TX N6** : Les paquets montants circulent du RAN vers le Réseau de Données
- **RX N6 ≈ TX N3** : Les paquets descendants circulent du Réseau de Données vers le RAN
- Un déséquilibre significatif peut indiquer :
  - Trafic asymétrique (téléchargements >> téléversements)
  - Pertes de paquets ou erreurs de transfert
  - Mauvaises configurations de routage

Statistiques XDP

Les statistiques XDP (eXpress Data Path) montrent la performance du traitement des paquets au niveau du noyau.



Métriques :

- **Abandonné** : Le programme XDP a rencontré une erreur (doit toujours être 0)

- **Jeter** : Paquets intentionnellement jetés par le programme XDP
- **Passer** : Paquets passés à la pile réseau pour un traitement ultérieur
- **Rediriger** : Paquets redirigés directement vers l'interface de sortie
- **TX** : Paquets transmis via XDP

Interprétation :

- **Abandonné > 0** : Problème critique avec le programme eBPF ou la compatibilité du noyau
- **Jeter > 0** : Pertes basées sur des politiques ou paquets invalides
- **Pass élevé** : La plupart des paquets traités dans la pile réseau (normal)
- **Rediriger élevé** : Paquets transférés directement (performance optimale)

Statistiques de Paquets

Répartition détaillée des protocoles de paquets et compteurs de traitement.

Compteurs de Protocoles :

- **RX ARP** : Paquets du Protocole de Résolution d'Adresse
- **RX GTP ECHO** : Demande/Réponse GTP-U Echo (keepalive)
- **RX GTP OTHER** : Autres messages de contrôle GTP
- **RX GTP PDU** : Données utilisateur encapsulées GTP-U (trafic principal)
- **RX GTP UNEXP** : Types de paquets GTP inattendus
- **RX ICMP** : Protocole de Message de Contrôle Internet (ping, erreurs)
- **RX ICMP6** : Paquets ICMPv6
- **RX IP4** : Paquets IPv4
- **RX IP6** : Paquets IPv6
- **RX OTHER** : Autres protocoles
- **RX TCP** : Paquets du Protocole de Contrôle de Transmission
- **RX UDP** : Paquets du Protocole de Datagramme Utilisateur

Cas d'Utilisation :

- **Surveiller le compte de GTP-U PDU** : Indicateur principal du trafic utilisateur
- **Vérifier ICMP pour la connectivité** : Test de la portée du réseau
- **Suivre le ratio TCP vs UDP** : Modèles de trafic d'application
- **Détecter des protocoles inattendus** : Problèmes de sécurité ou de mauvaise configuration

---

Statistiques de Routage

Statistiques de recherche FIB (Forwarding Information Base) pour les décisions de routage.

Recherche FIB IPv4 :

- **Cache** : Recherches de route mises en cache (chemin rapide)
- **OK** : Recherches de route réussies

Recherche FIB IPv6 :

- **Cache** : Recherches de route IPv6 mises en cache
- **OK** : Recherches de route IPv6 réussies

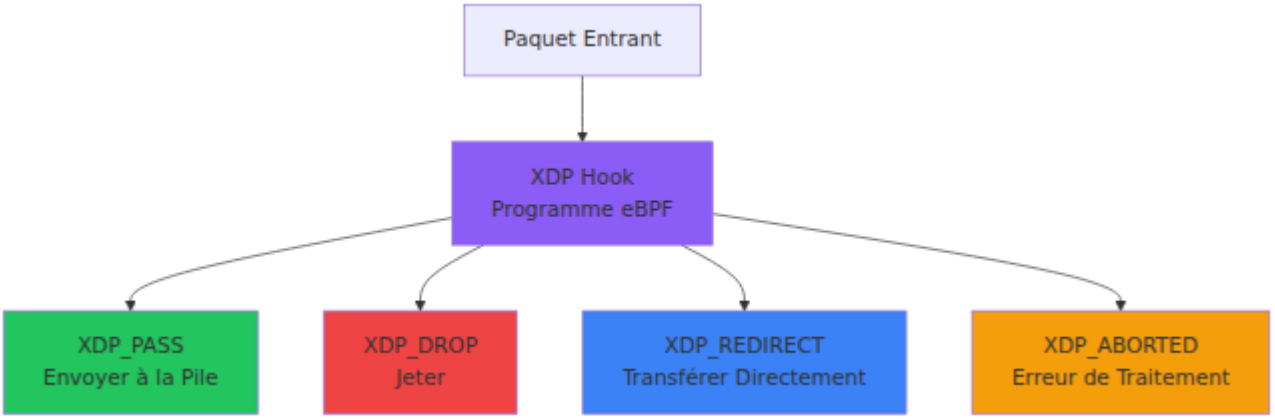
Indicateurs de Performance :

- **Taux de Hit de Cache Élevé** : Indique une bonne performance du cache de routage
- **Compteur OK Élevé** : Confirme que les tables de routage sont correctement configurées
- **Recherches Basses ou Nulles** : Peut indiquer que le trafic ne circule pas ou que le routage est contourné

Surveillance de la Capacité

Capacité de la Carte eBPF

La surveillance de la capacité de la carte eBPF prévient les échecs d'établissement de session dus à l'épuisement des ressources.



Cartes eBPF Critiques

far_map (Règles d'Action de Transfert) :

- **Capacité** : 131,070 entrées
- **Taille de Clé** : 4 B (ID FAR)
- **Taille de Valeur** : 16 B (paramètres de transfert)
- **Utilisation de Mémoire** : ~2.6 MB
- **Criticité** : Élevée - Utilisée pour toutes les décisions de transfert de paquets

pdr_map_downlin (PDRs Descendants - IPv4) :

- **Capacité** : 131,070 entrées
- **Taille de Clé** : 4 B (adresse IPv4 de l'UE)
- **Taille de Valeur** : 208 B (info PDR)
- **Utilisation de Mémoire** : ~27 MB
- **Criticité** : Critique - L'établissement de session échoue si plein

pdr_map_downlin_ip6 (PDRs Descendants - IPv6) :

- **Capacité** : 131,070 entrées
- **Taille de Clé** : 16 B (adresse IPv6 de l'UE)
- **Taille de Valeur** : 208 B (info PDR)
- **Utilisation de Mémoire** : ~29 MB
- **Criticité** : Critique - L'établissement de session IPv6 échoue si plein

pdr_map_teid_ip (PDRs Montants) :

- **Capacité** : 131,070 entrées
- **Taille de Clé** : 4 B (TEID)
- **Taille de Valeur** : 208 B (info PDR)
- **Utilisation de Mémoire** : ~27 MB
- **Criticité** : Critique - Le trafic montant échoue si plein

qer_map (Règles d'Application de QoS) :

- **Capacité** : 65,535 entrées
- **Taille de Clé** : 4 B (ID QER)
- **Taille de Valeur** : 32 B (paramètres QoS)
- **Utilisation de Mémoire** : ~2.3 MB
- **Criticité** : Moyenne - Application de QoS uniquement

urr_map (Règles de Rapport d'Utilisation) :

- **Capacité** : 131,070 entrées
- **Taille de Clé** : 4 B (ID URR)
- **Taille de Valeur** : 16 B (compteurs de volume)
- **Utilisation de Mémoire** : ~2.6 MB
- **Criticité** : Faible - N'affecte que la facturation

Seuils de Capacité

Seuil	Action Requise
0-50% (Vert)	Fonctionnement normal - Aucune action requise
50-70% (Jaune)	Prudence - Surveiller les tendances de croissance, planifier une augmentation de capacité
70-90% (Ambre)	Avertissement - Planifier une augmentation de capacité dans la semaine
90-100% (Rouge)	Critique - Action immédiate requise, de nouvelles sessions échoueront

Procédure d'Augmentation de Capacité

Avant d'augmenter la capacité :

1. Examiner les tendances d'utilisation actuelles
2. Estimer le taux de croissance futur
3. Calculer la capacité requise

Étapes pour augmenter la capacité de la carte :

1. Arrêter le service OmniUPF
2. Mettre à jour le fichier de configuration UPF avec les nouvelles tailles de carte
3. Redémarrer le service OmniUPF
4. Vérifier la nouvelle capacité dans la vue Capacité
5. Surveiller l'établissement de session réussi

Remarque : Changer la capacité de la carte eBPF nécessite un redémarrage de l'UPF et efface toutes les sessions existantes.

Métriques de Performance

Pour des informations détaillées sur toutes les métriques Prometheus exposées par OmniUPF, voir la **Référence des Métriques**.

Taux de Traitement des Paquets

Calcul :

```
Taux de Paquets (pps) = (Delta de Compte de Paquets) / (Delta de Temps en secondes)
```

Exemple :

- Paquets RX initiaux : 7,000

- Après 10 secondes : 17,000
- Taux de Paquets = (17,000 - 7,000) / 10 = 1,000 pps

Objectifs de Performance :

- **Petit UPF** : 10,000 - 100,000 pps
- **UPF Moyen** : 100,000 - 1,000,000 pps
- **Grand UPF** : 1,000,000 - 10,000,000 pps

Indicateurs de Goulot d'Étranglement :

- Compte XDP abandonné en augmentation
- Utilisation CPU élevée
- Pertes de paquets en augmentation
- Latence en augmentation

Calcul du Débit

Calcul :

```
Débit (Mbps) = (Delta de Compte d'Octets × 8) / (Delta de Temps en secondes × 1,000,000)
```

Exemple :

- Octets RX initiaux : 500 MB
- Après 60 secondes : 800 MB
- Débit = (300 MB × 8) / (60 × 1,000,000) = 40 Mbps

Planification de Capacité :

- Surveiller les heures de débit de pointe (par exemple, heures du soir)
- Comparer à la capacité de lien (vitesses des interfaces N3/N6)
- Planifier pour 2x le débit de pointe pour la marge

Taux de Perte

Calcul :

```
Taux de Perte (%) = (Paquets Jetés / Total des Paquets RX) × 100
```

Seuils Acceptables :

- **< 0.1%** : Excellent (perte de paquets normale due à des erreurs)
- **0.1% - 1%** : Bon (problèmes mineurs ou limitation de taux)
- **1% - 5%** : Mauvais (enquêter sur des problèmes de QoS ou de capacité)
- **> 5%** : Critique (problème majeur de transfert ou de capacité)

Causes Courantes de Pertes :

- Limitation de taux QER (MBR dépassé)
- Échecs de recherche de carte eBPF
- TEIDs ou IPs UE invalides
- Erreurs de routage

Alertes et Seuils

Alertes Recommandées

Alertes Critiques (Réponse immédiate requise) :

- Capacité de la carte eBPF > 90%
- Compte XDP abandonné > 0
- Taux de perte > 5%
- Vérification de santé de l'UPF échouée

Alertes d'Avertissement (Réponse dans l'heure) :

- Capacité de la carte eBPF > 70%

- Taux de perte > 1%
- Taux de paquets approchant la capacité de lien
- TTL de tampon dépassé (paquets plus vieux que 30s)

Alertes Informatiques (Surveiller les tendances) :

- Capacité de la carte eBPF > 50%
- Compte de paquets mis en tampon en augmentation
- Nouvelles associations PFCP établies/libérées
- Seuils de volume URR dépassés

Configuration des Alertes

Les alertes peuvent être configurées via :

1. **Métriques Prometheus** : Exporter des métriques pour une surveillance externe (voir Référence des Métriques pour la liste complète)
2. **Surveillance des Journaux** : Analyser les journaux d'OmniUPF pour des modèles d'erreurs
3. **Interrogation de l'API REST** : Interroger périodiquement les points de terminaison `/map_info`, `/packet_stats`
4. **Surveillance de l'Interface Web** : Surveillance manuelle via les pages Statistiques et Capacit��

Planification de la Capacité

Estimation de la Capacité de Session

Calculer le nombre maximum de sessions :

```
Max Sessions = min(
  Capacité de la Carte PDR / 2,  # PDRs Descendants + Montants par
session
  Capacité de la Carte FAR / 2,  # FARs Descendants + Montants par
session
  Capacité de la Carte QER       # Optionnel, un QER par session
)
```

Exemple :

- Capacité de la Carte PDR : 131,070
- Capacité de la Carte FAR : 131,070
- Capacité de la Carte QER : 65,535

Max Sessions = min(131,070 / 2, 131,070 / 2, 65,535) = **65,535 sessions**

Capacité Mémoire

Calculer la mémoire totale de la carte eBPF :

```
Mémoire = Σ (Capacité de la Carte × (Taille de Clé + Taille de
Valeur))
```

Exemple de Configuration :

- Cartes PDR : 3 × 131,070 × 212 B = 83.3 MB
- Carte FAR : 131,070 × 20 B = 2.6 MB
- Carte QER : 65,535 × 36 B = 2.3 MB
- Carte URR : 131,070 × 20 B = 2.6 MB
- **Total** : ~91 MB de mémoire du noyau

Considérations de Mémoire du Noyau :

- Assurez-vous d'une limite de mémoire verrouillée suffisante (`ulimit -l`)
- Réserver 2x l'utilisation estimée pour une marge de sécurité
- Surveiller la disponibilité de la mémoire du noyau

Capacité de Trafic

Calculer la capacité de débit requise :

1. **Estimer le débit moyen de session** :
   - Streaming vidéo : ~5 Mbps
   - Navigation Web : ~1 Mbps
   - VoIP : ~0.1 Mbps
2. **Calculer le débit agrégé** :

```
Débit Total = Sessions × Débit Moyen par Session
```

3. **Ajouter une marge** :

```
Capacité Requise = Débit Total × 2  # 100% de marge
```

Exemple :

- 10,000 sessions simultanées
- Moyenne de 2 Mbps par session
- Total : 20 Gbps
- Capacité requise : 40 Gbps (interfaces N3 + N6)

Planification de la Croissance

Analyse des Tendances :

1. Enregistrer le nombre de sessions de pointe quotidien
2. Calculer le taux de croissance hebdomadaire
3. Extrapoler jusqu'à la limite de capacité

Formule du Taux de Croissance :

```
Semaines jusqu'à la Capacité = (Capacité - Utilisation Actuelle) /
(Croissance Hebdomadaire)
```

Exemple :

- Sessions actuelles : 30,000
- Capacité : 65,535 sessions
- Croissance hebdomadaire : 2,000 sessions
- Semaines jusqu'à la capacité : (65,535 - 30,000) / 2,000 = **17.8 semaines**

Action : Planifier une mise à niveau de capacité dans 12 semaines (laissant 5 semaines de marge).

Dépannage des Problèmes de Performance

Taux de Perte de Paquet Élevé

Symptômes : Taux de perte > 1%, plaintes des utilisateurs concernant une connectivité médiocre

Diagnostic :

1. Vérifier Statistiques → Statistiques de Paquets
2. Identifier si les pertes sont spécifiques à un protocole
3. Examiner les Statistiques XDP pour les pertes XDP par rapport aux abandons

Causes Courantes :

- **Limitation de Taux QER** : Vérifier les valeurs MBR QER par rapport au trafic réel
- **TEIDs Invalides** : Vérifier que le TEID PDR montant correspond à l'attribution gNB

- **IP UE Inconnues** : Vérifier qu'un PDR descendant existe pour l'IP UE
- **Dépassement de Tampon** : Vérifier les statistiques de tampon

Résolution :

- Augmenter le MBR QER si limitation de taux
- Vérifier que le SMF a créé les PDR corrects
- Vider les tampons si un dépassement est détecté

Erreurs de Traitement XDP

Symptômes : XDP abandonné > 0

Diagnostic :

1. Naviguer vers Statistiques → Statistiques XDP
2. Vérifier le compteur abandonné
3. Examiner les journaux d'OmniUPF pour des erreurs eBPF

Causes Courantes :

- Échec de vérification du programme eBPF
- Incompatibilité de version du noyau
- Erreurs d'accès à la carte eBPF
- Corruption de mémoire

Résolution :

- Redémarrer le service OmniUPF
- Vérifier que la version du noyau respecte les exigences minimales (Linux 5.4+)
- Examiner les journaux du programme eBPF
- Contacter le support si le problème persiste

Épuisement de Capacité

Symptômes : Échecs d'établissement de session, capacité de carte à 100%

Diagnostic :

1. Naviguer vers la page Capacité
2. Identifier quelle carte est à 100%
3. Vérifier si les sessions sont bloquées (non supprimées)

Atténuation Immédiate :

1. Identifier les sessions obsolètes (vérifier la page Sessions)
2. Demander au SMF de supprimer les anciennes sessions
3. Vider les tampons pour libérer des entrées FAR

Résolution à Long Terme :

1. Augmenter la capacité de la carte eBPF
2. Planifier un redémarrage de l'UPF avec des cartes plus grandes
3. Mettre en œuvre des politiques de nettoyage des sessions

Dégradation de Performance

Symptômes : Latence élevée, faible débit, saturation CPU

Diagnostic :

1. Vérifier le taux de paquets par rapport à la base de référence historique
2. Examiner les statistiques XDP pour des retards de traitement
3. Surveiller l'utilisation CPU sur l'hôte UPF
4. Vérifier l'utilisation des interfaces N3/N6

Causes Courantes :

- Trafic dépassant la capacité de l'UPF
- Cœurs CPU insuffisants pour le traitement des paquets

- Goulot d'étranglement de l'interface réseau
- Collisions de hachage de carte eBPF

Résolution :

- Élargir l'UPF horizontalement (ajouter plus d'instances)
- Mettre à niveau le CPU ou activer le RSS (Répartition de Charge de Réception)
- Mettre à niveau les interfaces réseau vers des vitesses plus élevées
- Ajuster la fonction de hachage de la carte eBPF

Documentation Connexe

- **Référence des Métriques** - Référence complète des métriques Prometheus
- **Guide des Opérations UPF** - Architecture générale et opérations de l'UPF
- **Guide de Gestion des Règles** - Configuration PDR, FAR, QER, URR
- **Guide des Opérations de l'Interface Web** - Fonctionnalités de surveillance du panneau de contrôle
- **Guide de Dépannage** - Problèmes courants et diagnostics
- **Guide d'Architecture** - Chemin de données eBPF et optimisation des performances

N9 Loopback : Exécution de SGWU et PGWU sur la même instance

Vue d'ensemble

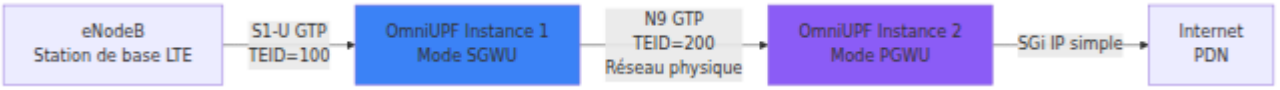
OmniUPF prend en charge l'exécution des fonctions **SGWU (Serving Gateway User Plane)** et **PGWU (PDN Gateway User Plane)** sur la **même instance** avec un **loopback N9 à latence nulle**. Ce mode de déploiement est idéal pour :

- **Déploiements EPC 4G simplifiés** - Instance UPF unique au lieu de deux
- **Optimisation des coûts** - Réduction de l'infrastructure et de la complexité opérationnelle
- **Edge computing** - Minimiser la latence pour les scénarios de sortie locale
- **Environnements de laboratoire/test** - Plane utilisateur EPC complet sur un seul serveur

Lorsqu'il est configuré avec la même adresse IP pour les interfaces N3 et N9, OmniUPF **détecte automatiquement** le trafic circulant entre les rôles SGWU et PGWU et le traite **entièrement en eBPF** sans jamais envoyer de paquets à l'interface réseau.

Comment ça fonctionne

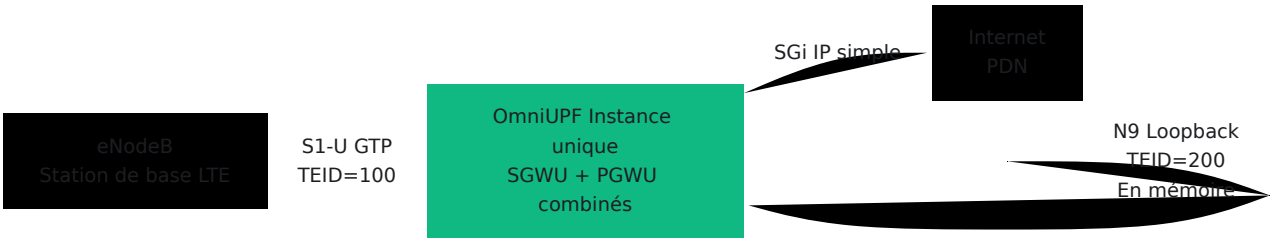
Déploiement traditionnel (Deux instances)



Flux de paquets :

1. eNodeB → SGWU : paquet GTP (TEID=100) arrive sur S1-U
2. SGWU : correspond à la PDR montante, encapsule dans un nouveau tunnel GTP (TEID=200)
3. **Paquet envoyé sur le réseau N9 physique** à l'instance PGWU
4. PGWU : reçoit GTP (TEID=200), décapsule, transfère à Internet
5. **Total : 2 passes XDP + 1 saut réseau**

Déploiement N9 Loopback (Instance unique)



Flux de paquets avec N9 Loopback :

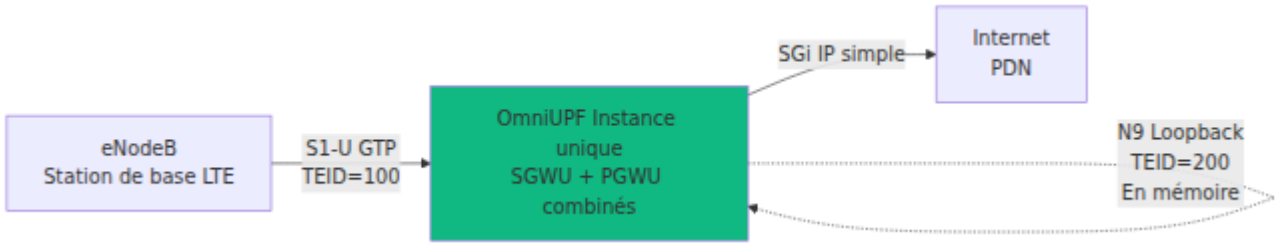
1. eNodeB → rôle SGWU : paquet GTP (TEID=100) arrive sur S1-U
2. Rôle SGWU : correspond à la PDR montante
3. **Détection de loopback :** IP de destination = IP locale (10.0.1.10)
4. **Traitement sur place :** Mise à jour du TEID GTP à 200 (session PGWU)
5. Rôle PGWU : décapsule, transfère à Internet
6. **Total : 1 passe XDP, zéro saut réseau**

Avantage de performance : Transfert interne sub-microseconde contre millisecondes pour un aller-retour réseau

---

Détails du traitement des paquets

Flux montante : eNodeB → SGWU → PGWU → Internet

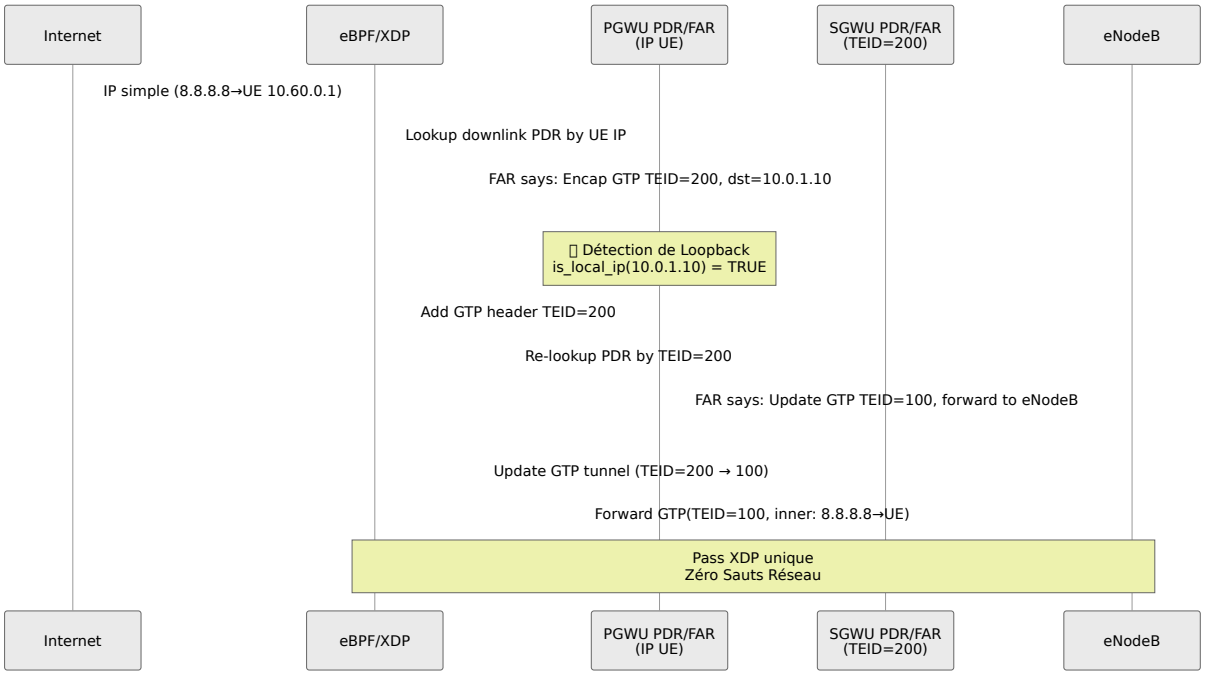


Chemin de code eBPF : `ebpf/xdp/n3n6_entrypoint.c` lignes 349-403

Étapes clés :

1. **Recevoir :** paquet GTP de eNodeB avec TEID=100
2. **Correspondance PDR :** Recherche de la PDR montante pour la session SGWU (TEID=100)
3. **Action FAR :** Encapsuler en GTP avec TEID=200, transférer à 10.0.1.10
4. **Vérification de loopback :** `is_local_ip(10.0.1.10)` retourne TRUE
5. **Mise à jour TEID :** Changer `ctx->gtp->teid` de 100 à 200 (en mémoire du noyau)
6. **Re-traitement :** Recherche de la PDR pour TEID=200 (session PGWU)
7. **Action FAR :** Supprimer l'en-tête GTP, transférer à Internet
8. **Route :** Envoyer le paquet IP simple à l'interface N6

Flux descendante : Internet → PGWU → SGWU → eNodeB



Chemin de code eBPF : `ebpf/xdp/n3n6_entrypoint.c` lignes 137-194 (IPv4), 265-322 (IPv6)

Étapes clés :

1. **Recevoir :** paquet IP simple d'Internet destiné à l'UE (10.60.0.1)
2. **Correspondance PDR :** Recherche de la PDR descendante par IP UE (session PGWU)
3. **Action FAR :** Encapsuler en GTP avec TEID=200, transférer à 10.0.1.10
4. **Vérification de loopback :** `is_local_ip(10.0.1.10)` retourne TRUE
5. **Ajouter GTP :** Encapsuler le paquet avec TEID=200
6. **Re-traitement :** Recherche de la PDR pour TEID=200 (session SGWU)
7. **Action FAR :** Mettre à jour le tunnel GTP vers eNodeB TEID=100
8. **Route :** Envoyer le paquet GTP à l'interface S1-U (eNodeB)

Configuration

Exigences

Plan de contrôle :

- **SGWU-C** : Doit se connecter à l'interface PFCP d'OmniUPF (par exemple, `192.168.1.10:8805`)
- **PGWU-C** : Doit se connecter à la **même** interface PFCP d'OmniUPF

Réseau :

- **Adresse IP unique** pour les interfaces N3 et N9
- **Adresses IP différentes** pour SGWU-C et PGWU-C (si exécuté sur le même hôte, utilisez des ports différents)

Configuration d'OmniUPF

`/etc/omniupf/runtime.exs`:

```
# Interfaces réseau
xdp_interfaces = "eth0"              # Interface unique pour S1-U
et N9
xdp_attach_mode = "native"           # Utiliser natif pour la
meilleure performance

# Interface PFCP
pfcp_address = "192.168.1.10"        # Adresse PFCP d'OmniUPF
pfcp_port = 8805                     # Port PFCP
node_id = "192.168.1.10"             # ID de nœud PFCP d'OmniUPF

# Interfaces de plane utilisateur
n3_address = "10.0.1.10"             # IP de l'interface S1-U/N3
n9_address = n3_address               # IP de l'interface N9
(IDENTIQUE à N3)

# Pools de ressources
feature_ueip = true
ueip_pool = "10.60.0.0/16"           # Pool d'adresses IP UE
feature_ftup = true
teid_pool_start = 1
teid_pool_end = 65_535

# Capacité
max_sessions = 100_000               # Nombre maximum de sessions
UE concurrentes

# API
api_port = 8080
```

Configuration clé :

- `n3_address` **et** `n9_address` **DOIVENT être identiques** pour activer le loopback
- Adresse PFCP d'écoute unique pour les deux plans de contrôle
- Nombre suffisant de `max_sessions` pour la charge combinée SGWU + PGWU

Configuration du plan de contrôle

Configuration SGWU-C

```
# Pointer vers l'interface PFCP d'OmniUPF
upf_pfcp_address: "192.168.1.10:8805"

# Interface S1-U (identique à n3_address d'OmniUPF)
sgwu_s1u_address: "10.0.1.10"

# Interface N9 pour le transfert vers PGWU (identique à OmniUPF)
sgwu_n9_address: "10.0.1.10"
```

Configuration PGWU-C

```
# Pointer vers la MÊME interface PFCP d'OmniUPF
upf_pfcp_address: "192.168.1.10:8805"

# Interface N9 (reçoit de SGWU)
pgwu_n9_address: "10.0.1.10"

# Interface SGi pour la connectivité Internet
pgwu_sgi_address: "192.168.100.1"
```

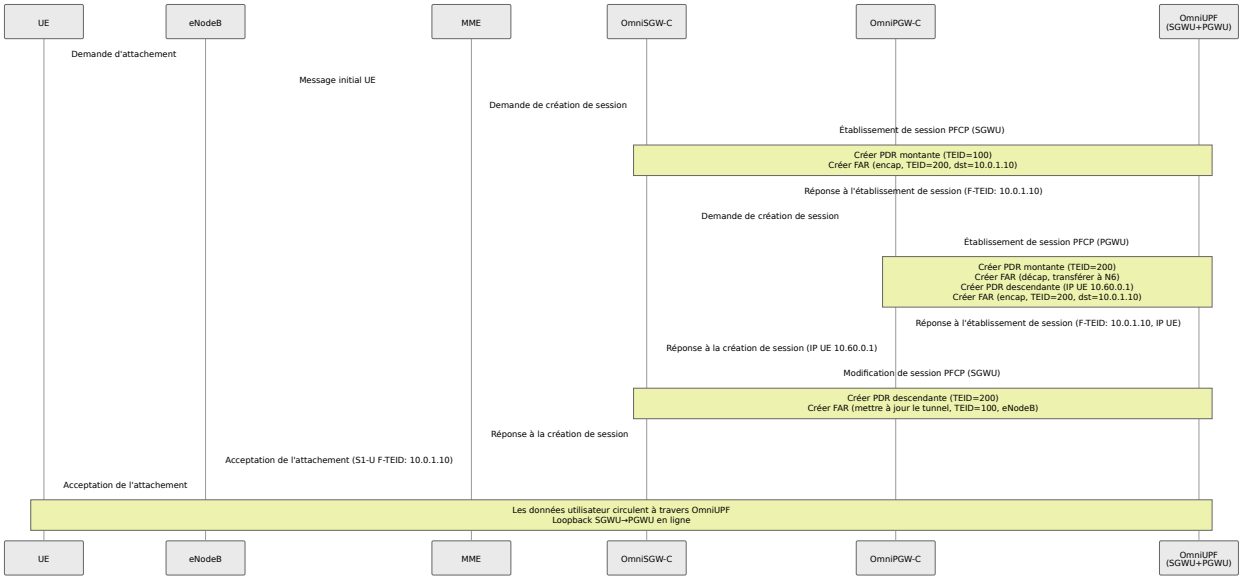
Important :

- Les deux plans de contrôle se connectent au **même point de terminaison PFCP** (`:8805`)
- OmniUPF crée **des associations PFCP séparées** pour SGWU-C et PGWU-C
- Les sessions sont isolées par plan de contrôle (suivies par ID de nœud)

Exemple de flux de session

Attachement UE et établissement de session PDU

Scénario : UE se connecte au réseau, établit une session de données



Sessions PFCP créées :

Session SGWU (de OmniSGW-C) :

- **PDR montante :** Correspondre TEID=100 (de eNodeB) → FAR : Encapsuler TEID=200, dst=10.0.1.10
- **PDR descendante :** Correspondre TEID=200 (de PGWU) → FAR : Mettre à jour le tunnel TEID=100, transférer à eNodeB

Session PGWU (de OmniPGW-C) :

- **PDR montante :** Correspondre TEID=200 (de SGWU) → FAR : Décapsuler, transférer à Internet
- **PDR descendante :** Correspondre IP UE=10.60.0.1 → FAR : Encapsuler TEID=200, dst=10.0.1.10

Surveillance et vérification

Vérifier que le N9 Loopback est actif

Vérifier les journaux XDP :

```
# Voir la sortie de débogage eBPF en temps réel
sudo cat /sys/kernel/debug/tracing/trace_pipe | grep loopback
```

Sortie attendue :

```
upf: [n3] session for teid:100 -> 200 remote:10.0.1.10
upf: [n9-loopback] self-forwarding detected, processing inline
TEID:200
upf: [n9-loopback] decapsulated, routing to N6

upf: [n6] use mapping 10.60.0.1 -> teid:200
upf: [n6-loopback] downlink self-forwarding detected, processing
inline TEID:200
upf: [n6-loopback] SGWU updating GTP tunnel to eNodeB TEID:100
upf: [n6-loopback] forwarding to eNodeB
```

Surveiller les sessions via l'API REST

Lister les associations PFCP :

```
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_pipeline | jq
```

Sortie attendue :

```
{
  "associations": [
    {
      "node_id": "sgwc.example.com",
      "address": "192.168.1.20:8805",
      "sessions": 1000
    },
    {
      "node_id": "pgwc.example.com",
      "address": "192.168.1.21:8805",
      "sessions": 1000
    }
  ],
  "total_sessions": 2000
}
```


Vérifiez deux associations séparées (une pour SGWU-C, une pour PGWU-C)

Lister les sessions actives :

```
curl http://localhost:8080/api/v1/sessions | jq '.sessions[] |
{local_seid, ue_ip, uplink_teid}'
```

Sortie attendue :


```
{
  "local_seid": 12345,
  "ue_ip": "10.60.0.1",
  "uplink_teid": 100
}
{
  "local_seid": 67890,
  "ue_ip": "10.60.0.1",
  "uplink_teid": 200
}
```


Chaque UE a DEUX sessions :

- Session de SGWU-C (TEID=100, interface S1-U)
- Session de PGWU-C (TEID=200, interface N9)

Métriques de performance

Vérifier les statistiques de paquets :

```
curl http://localhost:8080/api/v1/xdp_stats | jq
```

Métriques clés :

- `xdp_processed` : Total des paquets traités en eBPF
- `xdp_pass` : Paquets passés à la pile réseau (devrait être zéro pour le trafic de loopback)
- `xdp_redirect` : Paquets transférés via redirection XDP
- `xdp_tx` : Paquets transmis (le trafic de loopback utilise cela)

Pour le trafic de loopback N9 :

- `xdp_pass` devrait être **minimal** (seulement le trafic non-loopback)
- `xdp_tx` ou `xdp_redirect` comptabilise le transfert de loopback

Dépannage

Trafic N9 allant au réseau au lieu de Loopback

Symptôme : Paquets envoyés à l'interface réseau, latence élevée

Cause racine : `n3_address` ≠ `n9_address`

Solution (dans `runtime.exs`) :

```
# FAUX :
n3_address = "10.0.1.10"
n9_address = "10.0.1.20"   # IP différente, pas de loopback !

# CORRECT :
n3_address = "10.0.1.10"
n9_address = n3_address     # Même IP, active le loopback
```

Vérification :

```
curl http://localhost:8080/api/v1/dataplane_config | jq
```

Doit afficher :

```
{
  "n3_ipv4_address": "10.0.1.10",
  "n9_ipv4_address": "10.0.1.10"
}
```

PDR non trouvée après Loopback

Symptôme : Les journaux montrent `[n9-loopback] no PDR for destination TEID`

Cause racine : Session PGWU non créée ou TEID non correspondant

Diagnostic :

1. **Vérifier les sessions PFCP :**

   ```
   curl http://localhost:8080/api/v1/sessions | jq '.sessions[] |
   select(.uplink_teid == 200)'
   ```

2. **Vérifier la configuration FAR :**

```
curl http://localhost:8080/api/v1/far_map | jq '.[] |
select(.teid == 200)'
```

Solution : Assurez-vous que PGWU-C crée une session avec un TEID correspondant à celui que SGWU-C utilise pour le transfert N9

Utilisation élevée du CPU

Symptôme : Utilisation du CPU supérieure à celle attendue

Cause racine : Programme eBPF traitant les paquets plusieurs fois ou recherches de carte excessives

Diagnostic :

```
# Vérifier les modèles d'accès à la carte eBPF
sudo bpftool map dump name pdr_map_teid_ip4 | wc -l
sudo bpftool map dump name far_map | wc -l
```

Solution :

- Augmenter `max_sessions` si la carte est pleine (provoque des échecs de recherche)
- Vérifier que la limitation de débit QER ne provoque pas de pertes et de retransmissions
- Vérifier les tampons de paquets excessifs

Perte de paquets lors du transfert

Symptôme : Paquets perdus lors du transfert eNodeB

Cause racine : Tamponnage non configuré ou limites de tampon insuffisantes

Configuration :

```
# Dans runtime.exs
buffer_port = 22152
```

Vérification :

```
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_buffer_info | jq
```

Avantages du N9 Loopback

Performance

Métrique	Deux instances	Instance unique (N9 Loopback)	Amélioration
Latence	1-5 ms	< 1 µs	**1000x plus rapide**
Débit	Limité par le réseau	Limité par le CPU/mémoire	**2-3x plus élevé**
Utilisation CPU	2× passes XDP + pile réseau	1× passe XDP	**Réduction de 40-50%**
Perte de paquets	Risque pendant la congestion réseau	Zéro (en mémoire)	**Éliminée**

Opérationnel

- **Déploiement simplifié :** Instance OmniUPF unique au lieu de deux
- **Infrastructure réduite :** Moitié des serveurs, ports réseau, adresses IP
- **Complexité réduite :** Configuration unique, point de surveillance unique

- **Économies de coûts :** Réduction du matériel, de l'énergie, du refroidissement, de la maintenance
- **Dépannage plus facile :** Traçage de paquets unique, sortie de débogage eBPF unique

Cas d'utilisation

Idéal pour :

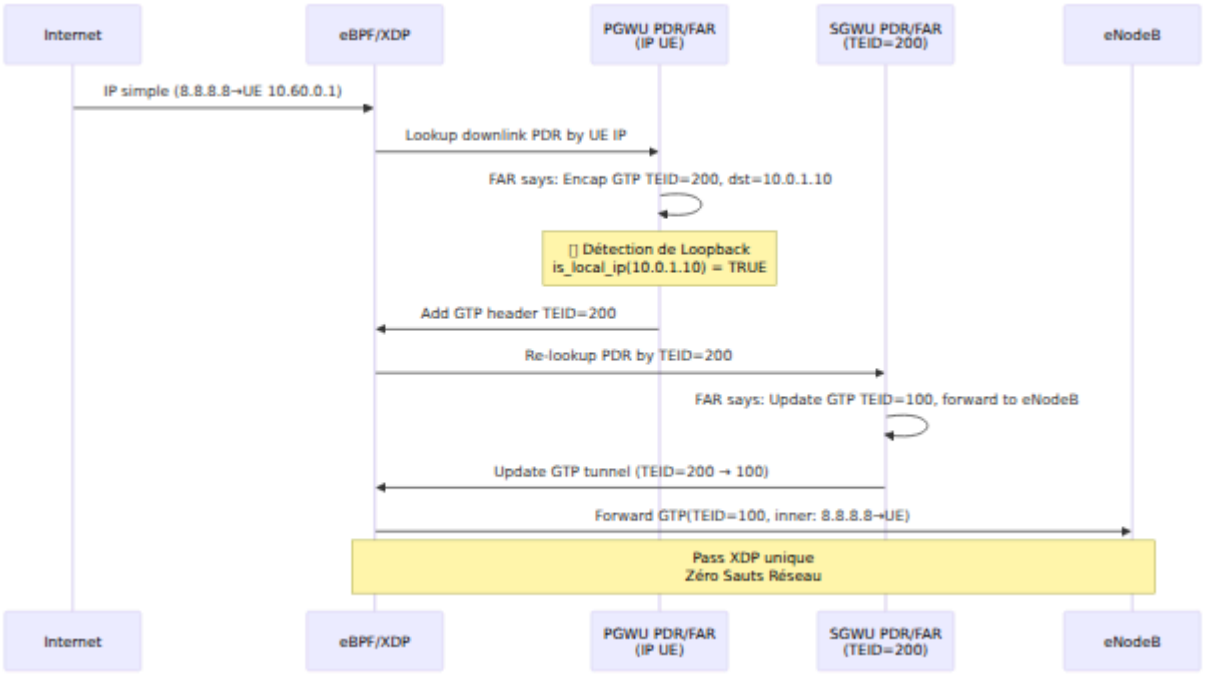
- **Edge Computing :** Minimiser la latence pour la sortie locale
- **Déploiements petits/moyens :** < 100K abonnés
- **Laboratoire/Test :** Plane utilisateur EPC complet sur une seule VM
- **Contraintes budgétaires :** Budget matériel limité

Non recommandé pour :

- **Redondance géographique :** SGWU et PGWU dans différents centres de données
- **Échelle massive :** > 1M abonnés (considérer l'évolutivité horizontale)
- **Exigences réglementaires :** Séparation obligatoire de SGW et PGW

Comparaison avec d'autres modes de déploiement

Instance unique (N9 Loopback) vs. Instances séparées



Résumé

N9 Loopback permet un **plane utilisateur EPC 4G de qualité opérateur sur une seule instance OmniUPF** en traitant le trafic SGWU→PGWU entièrement en eBPF sans sauts réseau. Cela fournit :

- [] **Latence sub-microseconde** pour le transfert inter-passarelle
- [] **Réduction de 40-50% du CPU** par rapport aux instances séparées
- [] **Opérations simplifiées** - instance unique, config, surveillance
- [] **Coût inférieur** - moitié de l'infrastructure
- [] **Conformité totale 3GPP** - protocoles PFCP, GTP-U standard

La configuration est automatique lorsque `n3_address == n9_address` - aucune option ou paramètre spécial requis. Le chemin de données eBPF d'OmniUPF détecte les conditions de loopback et traite les paquets en ligne.

Pour plus d'informations :

- **Configuration :** CONFIGURATION.md
- **Architecture :** ARCHITECTURE.md
- **Référence des métriques :** METRICS.md
- **Surveillance :** MONITORING.md
- **Opérations :** OPERATIONS.md
- **Dépannage :** TROUBLESHOOTING.md

Référence des Codes de Cause PFCP

Aperçu

PFCP (Packet Forwarding Control Protocol) utilise des codes de cause dans les messages de réponse pour indiquer le résultat des demandes. Ce document décrit les codes de cause implémentés dans OmniUPF et quand ils se produisent lors du traitement des messages PFCP.

Tous les codes de cause sont conformes aux spécifications **3GPP TS 129.244** et sont renvoyés dans les messages de réponse PFCP pour indiquer le succès, l'échec ou des conditions d'erreur spécifiques.

Suivi des Codes de Cause

OmniUPF suit les résultats des messages PFCP à l'aide de métriques Prometheus. Chaque réponse PFCP comprend un code de cause qui est enregistré dans :

```
upf_pfcp_rx_errors{message_name="...", cause_code="...",
peer_address="..."}
```

Cela permet de surveiller :

- **Taux de succès** par type de message et nœud de plan de contrôle
- **Modèles d'erreur** indiquant des erreurs de configuration ou des problèmes de protocole
- **Santé de l'association** basée sur les taux de rejet

Voir Référence des Métriques pour la documentation complète des métriques PFCP.

Catégories de Codes de Cause

Codes de Succès

Code	Nom	Quand Cela Se Produit
1	**RequestAccepted**	Demande traitée avec succès. Tous les IEs obligatoires présents et valides. Règles créées/modifiées/supprimées avec succès.

Codes d'Erreur Client

Code	Nom	Quand Cela Se Produit
64	**RequestRejected**	Rejet général pour des erreurs non spécifiées. Utilisé lorsque aucun code de cause spécifique ne s'applique.
65	**SessionContextNotFound**	Modification ou suppression de session demandée pour un SEID inconnu. La session spécifiée n'existe pas sur ce UPF.
66	**MandatoryIEMissing**	Élément d'information requis absent. Exemples : NodeID manquant dans la configuration de l'association, F-SEID manquant dans l'établissement de session, RecoveryTimeStamp manquant.
67	**ConditionalIEMissing**	IE conditionnellement requis manquant en fonction des autres IEs présents. Utilisé lorsque les IEs dépendent de la présence des autres.
69	**MandatoryIEIncorrect**	IE requis présent mais contenant des données invalides. Exemples : format de NodeID non analysable, valeur de

Code	Nom	Quand Cela Se Produit
		RecoveryTimeStamp invalide, F-SEID mal formé.
72	**NoEstablishedPFCPAssociation**	Opération de session tentée sans association active. Doit établir une association PFCP avant de créer des sessions.
73	**RuleCreationModificationFailure**	Erreur lors de l'application des règles PDR, FAR, QER ou URR au chemin de données eBPF. Causes possibles : capacité de la carte eBPF épuisée, paramètres de règle invalides, échec de l'allocation de ressources.

Codes d'Erreur Serveur/Ressource

Code	Nom	Quand Cela Se Produit
74	**PFCPEntityInCongestion**	UPF subissant une forte charge ou une exhaustion de ressources. Incapable de traiter temporairement les demandes.
75	**NoResourcesAvailable**	Ressources insuffisantes pour satisfaire la demande. Exemples : capacité de la carte eBPF épuisée, échec de l'allocation de mémoire, pool TEID épuisé.
77	**SystemFailure**	Erreur interne critique empêchant le traitement de la demande. Exemples : échec du programme eBPF, erreur d'interface du noyau, corruption de base de données.

Codes de Fonctionnalité Non Supportée

Code	Nom	Quand Cela Se Produit
68	**InvalidLength**	Le champ de longueur de l'IE ne correspond pas à la longueur réelle des données. Actuellement inutilisé dans OmniUPF.
70	**InvalidForwardingPolicy**	Politique de transfert non supportée par le UPF. Actuellement inutilisé dans OmniUPF.
71	**InvalidFTEIDAllocationOption**	Option d'allocation F-TEID non supportée. Actuellement inutilisé dans OmniUPF.
76	**ServiceNotSupported**	Service ou fonctionnalité demandée non implémenté. Actuellement inutilisé dans OmniUPF.
78	**RedirectionRequested**	UPF demande une redirection vers une autre instance UPF. Actuellement inutilisé dans OmniUPF.

Scénarios et Causes Courants

Échecs de Configuration d'Association

Scénario : NodeID Manquant

```
SMF → UPF : Demande de Configuration d'Association (pas de NodeID)
UPF → SMF : Réponse de Configuration d'Association (Cause :
MandatoryIEMissing)
```

Résolution : Assurez-vous que le SMF inclut l'IE NodeID dans toutes les demandes de configuration d'association.

Scénario : Format de NodeID Invalide

```
SMF → UPF : Demande de Configuration d'Association
(NodeID="invalide")
UPF → SMF : Réponse de Configuration d'Association (Cause :
MandatoryIEIncorrect)
```

Résolution : NodeID doit être un FQDN valide ou une adresse IPv4/IPv6.

Scénario : Timestamp de Récupération Manquant

```
SMF → UPF : Demande de Configuration d'Association (pas de
RecoveryTimeStamp)
UPF → SMF : Réponse de Configuration d'Association (Cause :
MandatoryIEMissing)
```

Résolution : Inclure RecoveryTimeStamp dans la demande de configuration d'association.

Échecs d'Établissement de Session

Scénario : Pas d'Association Établie

```
SMF → UPF : Demande d'Établissement de Session
UPF → SMF : Réponse d'Établissement de Session (Cause :
NoEstablishedPFCPAssociation)
```

Résolution : Établir l'association PFCP avant de créer des sessions.

Scénario : Échec de Création de Règle

```
SMF → UPF : Demande d'Établissement de Session
UPF traite les FAR, QER, URR avec succès
UPF échoue à créer PDR (carte eBPF pleine)
UPF → SMF : Réponse d'Établissement de Session (Cause :
RuleCreationModificationFailure)
```

Résolution :

- Vérifiez la capacité de la carte eBPF (voir Suivi de Capacité)
- Augmentez les tailles de carte dans la configuration UPF
- Réduisez le nombre de sessions actives

Scénario : F-SEID Manquant

```
SMF → UPF : Demande d'Établissement de Session (pas de CP F-SEID)
UPF → SMF : Réponse d'Établissement de Session (Cause :
MandatoryIEMissing)
```

Résolution : Inclure CP F-SEID dans la demande d'établissement de session.

Échecs de Modification de Session

Scénario : SEID Inconnu

```
SMF → UPF : Demande de Modification de Session (SEID=12345)
UPF n'a pas de session avec SEID 12345
UPF → SMF : Réponse de Modification de Session (Cause :
SessionContextNotFound)
```

Résolution :

- Vérifiez que le SEID correspond à la valeur de la réponse d'établissement de session
- Vérifiez si la session a déjà été supprimée
- Assurez-vous d'utiliser la bonne instance UPF (scénarios de boucle N9)

Échecs de Suppression de Session

Scénario : SEID Inconnu

```
SMF → UPF : Demande de Suppression de Session (SEID=67890)
UPF n'a pas de session avec SEID 67890
UPF → SMF : Réponse de Suppression de Session (Cause :
SessionContextNotFound)
```

Résolution : Le SEID peut avoir déjà été supprimé ou n'a jamais existé.

Dépannage avec les Codes de Cause

Utilisation des Métriques Prometheus

Interrogez Prometheus pour identifier les modèles d'erreur :

```
# Taux d'erreur par code de cause
rate(upf_pfcp_rx_errors{cause_code!="RequestAccepted"}[5m])

# Principales causes de rejet
topk(5, sum by (cause_code) (upf_pfcp_rx_errors))

# Erreurs par pair SMF
sum by (peer_address, cause_code)
(upf_pfcp_rx_errors{cause_code!="RequestAccepted"})

# Échecs d'établissement de session
upf_pfcp_rx_errors{message_name="SessionEstablishmentRequest",
cause_code!="RequestAccepted"}
```

Utilisation de l'Interface Web

Naviguez vers la page **Sessions** pour voir :

- Nombre de sessions actives par nœud de plan de contrôle
- Taux de succès/échec d'établissement de session
- Erreurs récentes de session

Naviguez vers la page **Capacité** pour diagnostiquer :

- Utilisation de la carte eBPF (cause racine de RuleCreationModificationFailure)
- Indicateurs d'épuisement des ressources

Voir Guide de l'Interface Web pour des instructions détaillées de suivi.

Étapes de Débogage Courantes

Taux Élevé de MandatoryIEMissing :

1. Vérifiez la configuration SMF pour les IEs requis
2. Vérifiez la compatibilité de la version de la bibliothèque PFCP
3. Examinez les journaux SMF pour les erreurs de construction d'IE

Échecs Fréquents de RuleCreationModificationFailure :

1. Vérifiez la capacité de la carte eBPF : `GET /api/v1/map_info`
2. Surveillez l'utilisation de la carte : `upf_ebpf_map_used / upf_ebpf_map_capacity`
3. Augmentez les tailles de carte dans la configuration si > 70 % utilisé
4. Voir Planification de Capacité

Erreurs NoEstablishedPFCPAssociation :

1. Vérifiez que l'association existe : `GET /api/v1/pfcp_associations`
2. Vérifiez la configuration du délai d'attente du heartbeat
3. Examinez les journaux de configuration de l'association
4. Assurez-vous que le SMF et le UPF peuvent se joindre

SessionContextNotFound lors de la Modification :

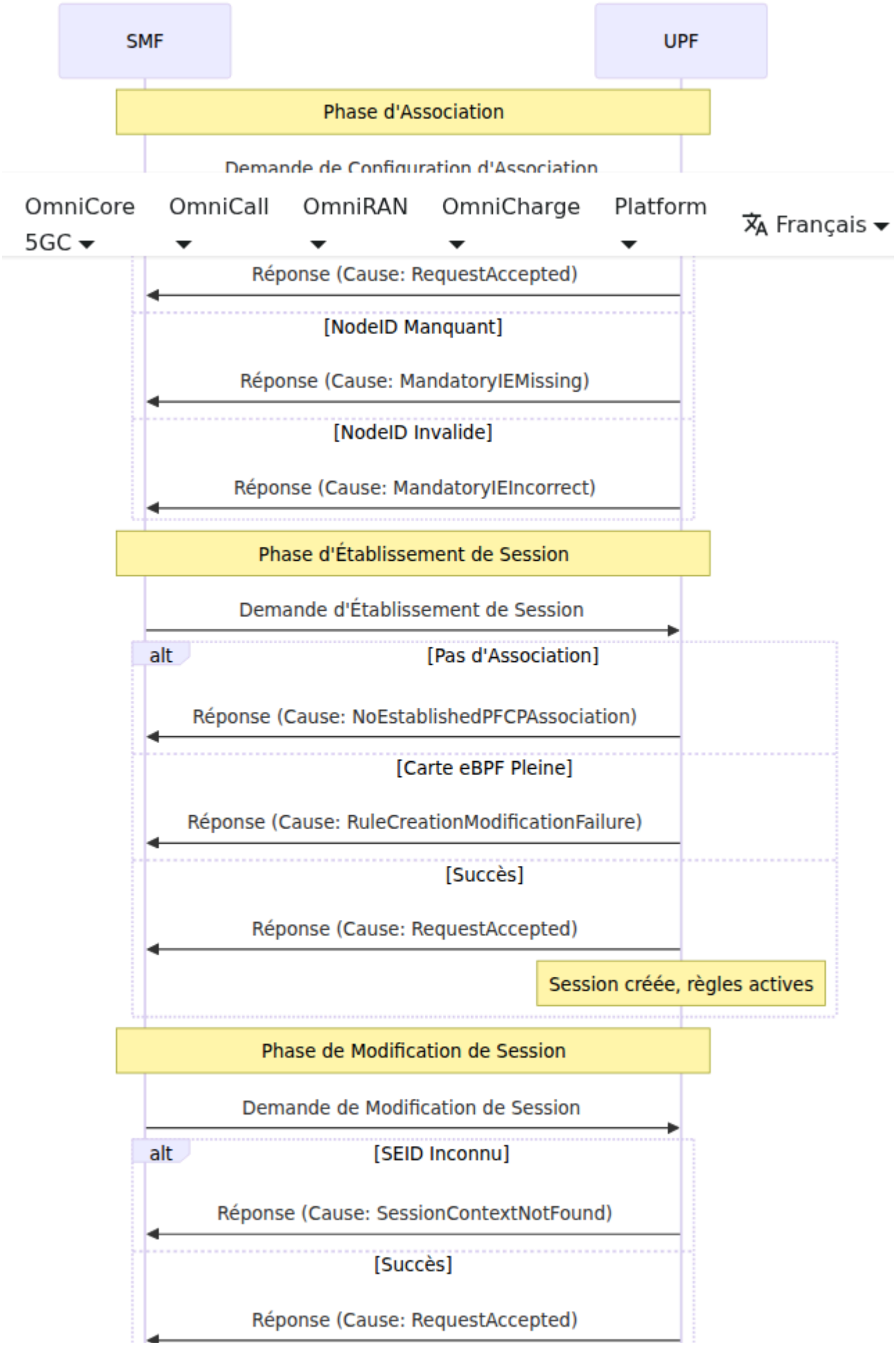
1. Vérifiez le SEID de la réponse d'établissement de session

2. Vérifiez si la session a été supprimée
3. Pour la boucle N9 : Assurez-vous d'utiliser le bon point de terminaison UPF
4. Interrogez les sessions actives : `GET /api/v1/pfcp_sessions`

Impact des Codes de Cause sur les

Opérations

Cycle de Vie de la Session


SMF
UPF
Phase d'Association
Demande de Configuration d'Association
OmniCore 5GC
OmniCall
OmniRAN
OmniCharge
Platform
Français
Réponse (Cause: RequestAccepted)
[NodeID Manquant]
Réponse (Cause: MandatoryIEMissing)
[NodeID Invalide]
Réponse (Cause: MandatoryIEIncorrect)
Phase d'Établissement de Session
Demande d'Établissement de Session
alt
[Pas d'Association]
Réponse (Cause: NoEstablishedPFCPAssociation)
[Carte eBPF Pleine]
Réponse (Cause: RuleCreationModificationFailure)
[Succès]
Réponse (Cause: RequestAccepted)
Session créée, règles actives
Phase de Modification de Session
Demande de Modification de Session
alt
[SEID Inconnu]
Réponse (Cause: SessionContextNotFound)
[Succès]
Réponse (Cause: RequestAccepted)

Métriques et Alertes

Alertes Recommandées :

```
# Critique : Taux de rejet élevé
- alert: PfcpHighRejectionRate
  expr: |
    rate(upf_pfcp_rx_errors{cause_code!="RequestAccepted"}[5m]) > 0.1
  annotations:
    summary: "Taux de rejet PFCP élevé : {{ $value }}/s"

# Avertissement : Problèmes de capacité
- alert: PfcpRuleCreationFailures
  expr: |

rate(upf_pfcp_rx_errors{cause_code="RuleCreationModificationFailure"}
[5m]) > 0
  annotations:
    summary: "Échecs de création de règles PFCP détectés"

# Avertissement : Problèmes d'association
- alert: PfcpNoAssociation
  expr: |

rate(upf_pfcp_rx_errors{cause_code="NoEstablishedPFCPAssociation"}
[5m]) > 0
  annotations:
    summary: "Sessions PFCP tentées sans association"
```

Conformité aux Normes 3GPP

OmniUPF implémente des codes de cause conformément à :

- **3GPP TS 129.244 v16.4.0** - spécification PFCP
- **Section 8.2.1** - définition de l'IE de cause

- **Section 8.19** - tableau des valeurs de cause

Documentation Connexe

- **Intégration du Protocole PFCP** - architecture PFCP et gestion des messages
- **Référence des Métriques** - documentation de la métrique upf_pfcp_rx_errors
- **Guide de Suivi** - suivi de capacité et alertes
- **Guide de Dépannage** - problèmes d'association et de session PFCP
- **Guide de l'Interface Web** - suivi des sessions et des associations

Guide de Gestion des Règles

Table des Matières

Aperçu

OmniUPF utilise un ensemble de règles interconnectées pour classifier, transférer, façonner et suivre le trafic du plan utilisateur. Ces règles sont installées par le SMF via PFCP et stockées dans des cartes eBPF pour un traitement des paquets à haute performance. Comprendre ces règles et leurs relations est essentiel pour faire fonctionner et dépanner le UPF.

Types de Règles

Type de Règle	Objectif	Champ Clé	Installé Par
PDR (Règle de Détection de Paquet)	Classifier les paquets en flux	TEID ou IP UE	SMF via Établissement/Modification de Session PFCP
FAR (Règle d'Action de Transfert)	Déterminer l'action de transfert	ID FAR	SMF via Établissement/Modification de Session PFCP
QER (Règle d'Application de QoS)	Appliquer des limites de bande passante et de marquage	ID QER	SMF via Établissement/Modification de Session PFCP
URR (Règle de Rapport d'Utilisation)	Suivre les volumes de données pour la facturation	ID URR	SMF via Établissement/Modification de Session PFCP

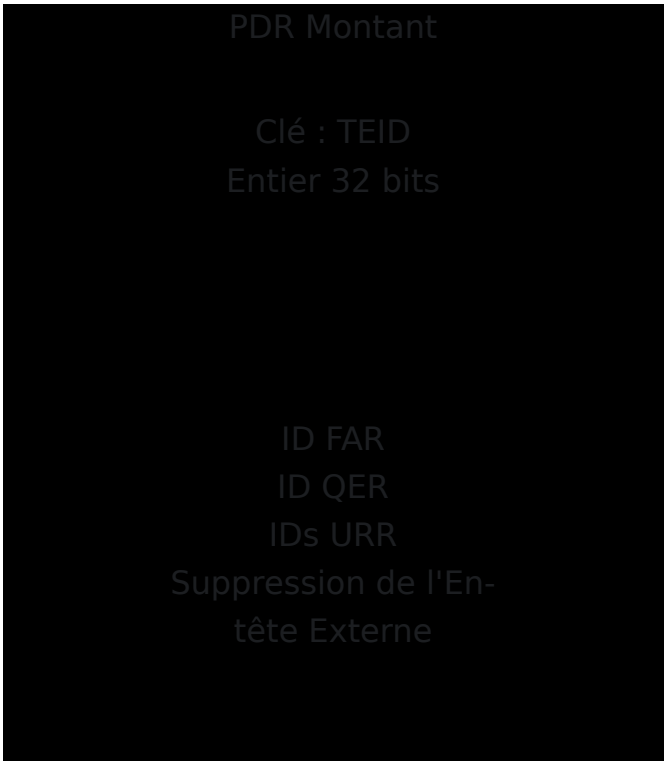
Flux de Traitement des Règles

Règles de Détection de Paquet (PDR)

Objectif

Les PDR classifient les paquets entrants en flux de trafic. Elles constituent le point d'entrée pour tout traitement de paquet dans le UPF.

Structure PDR



PDR Montants

Les PDR montants correspondent aux paquets arrivant sur l'interface N3 depuis le RAN.

Champ Clé : TEID (Identifiant de Point de Terminaison de Tunnel)

- Entier non signé de 32 bits
- Assigné par le SMF et signalé au gNB
- Unique par flux de trafic UE

Champs de Valeur :

- **ID FAR** : Référence à la règle d'action de transfert
- **ID QER** : Référence à la règle d'application de QoS (optionnel)
- **IDs URR** : Liste des règles de rapport d'utilisation (optionnel)
- **Suppression de l'En-tête Externe** : Indicateur pour retirer l'encapsulation GTP-U

Processus de Recherche :

1. Extraire le TEID de l'en-tête GTP-U
2. Recherche de hachage dans la carte eBPF `uplink_pdr_map`
3. Si une correspondance est trouvée, récupérer l'ID FAR, l'ID QER et les IDs URR
4. Si aucune correspondance, rejeter le paquet

Exemple :

```
TEID : 5678
ID FAR : 2
ID QER : 1
Suppression de l'En-tête Externe : Faux
Mode SDF : Pas de SDF
```

PDR Descendants

Les PDR descendants correspondent aux paquets arrivant sur l'interface N6 depuis le réseau de données.

Champ Clé : Adresse IP UE

- Adresse IPv4 (32 bits) ou adresse IPv6 (128 bits)
- Assignée par le SMF lors de l'établissement de la session PDU
- Unique par UE

Champs de Valeur :

- **ID FAR** : Référence à la règle d'action de transfert
- **ID QER** : Référence à la règle d'application de QoS (optionnel)
- **IDs URR** : Liste des règles de rapport d'utilisation (optionnel)
- **Mode SDF** : Mode de filtre de flux de données de service
  - `Pas de SDF` : Pas de filtrage, tout le trafic correspond

    - `SDF Seulement` : Seul le trafic correspondant au SDF est transféré
    - `SDF + Par Défaut` : Le trafic correspondant au SDF utilise des règles spécifiques, l'autre trafic utilise le FAR par défaut
- **Filtres SDF** : Filtres spécifiques à l'application (ports, protocoles, plages IP)

Processus de Recherche :

1. Extraire l'IP de destination de l'en-tête du paquet
2. Recherche de hachage dans `downlink_pdr_map` (IPv4) ou `downlink_pdr_map_ip6` (IPv6)
3. Si une correspondance est trouvée, vérifier les filtres SDF (si configurés)
4. Récupérer l'ID FAR, l'ID QER et les IDs URR
5. Si aucune correspondance, rejeter le paquet

Exemple :

```
IP UE : 10.45.0.1
ID FAR : 1
ID QER : 1
Suppression de l'En-tête Externe : Faux
Mode SDF : Pas de SDF
```

Filtres SDF (Flux de Données de Service)

Les filtres SDF fournissent une classification de trafic spécifique à l'application au sein d'un PDR.

Cas d'Utilisation :

- Différencier le trafic YouTube de la navigation web
- Appliquer une QoS différente pour VoIP par rapport aux données à meilleur effort
- Acheminer des applications spécifiques à travers différents chemins réseau

Critères de Filtre :

- **Protocole** : TCP, UDP, ICMP
- **Plage de Ports** : Ports de destination (par exemple, 443 pour HTTPS, 5060 pour SIP)
- **Plage d'Adresse IP** : Réseaux de destination spécifiques
- **Description de Flux** : Modèles de flux définis par la 3GPP

Exemple de Configuration SDF :

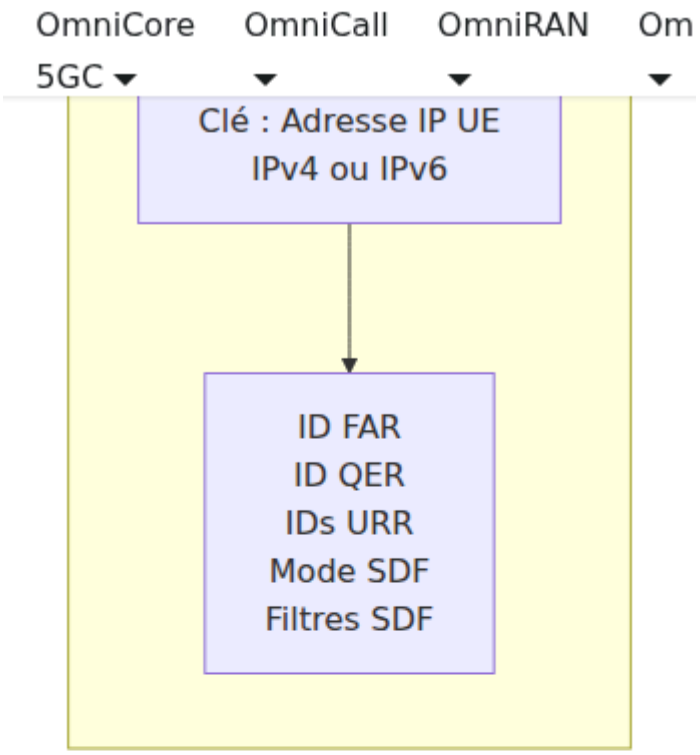
```
ID PDR : 10
IP UE : 10.45.0.1
Mode SDF : SDF Seulement
Filtres SDF :
  - Protocole : UDP, Ports : 5060-5061 → ID FAR 5 (FAR VoIP)
  - Protocole : TCP, Port : 443 → ID FAR 1 (FAR par Défaut)
```

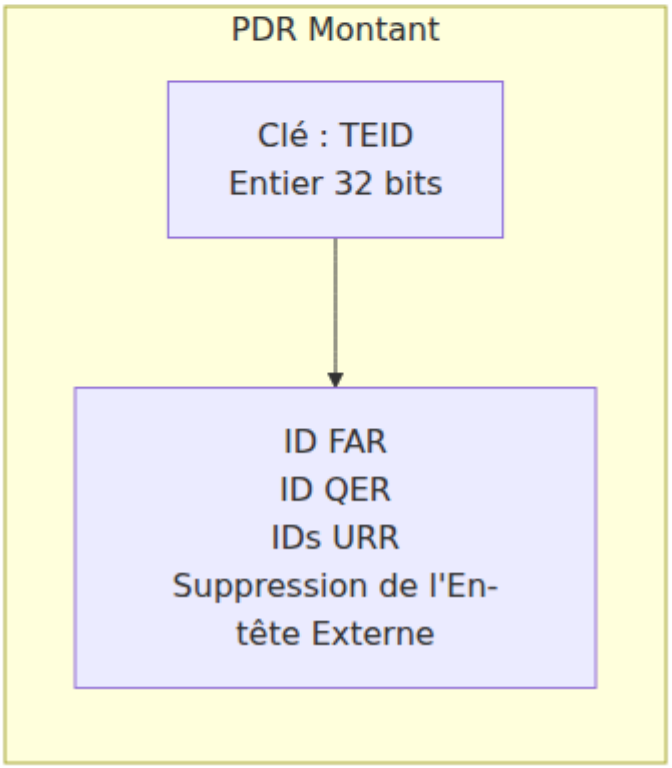
Règles d'Action de Transfert (FAR)

Objectif

Les FAR déterminent quoi faire avec les paquets qui correspondent à un PDR. Elles définissent les actions de transfert, les paramètres d'encapsulation GTP-U et les points de destination.

Structure FAR





Drapeaux d'Action

Les actions FAR sont des drapeaux binaires qui peuvent être combinés :

Drapeau	Bit	Valeur	Description
TRANSFÉRER	1	2	Transférer le paquet à la destination
BUFFER	2	4	Stocker le paquet dans le buffer
REJETER	0	1	Rejeter le paquet
NOTIFIER	3	8	Envoyer une notification au plan de contrôle
DUPLIQUER	4	16	Dupliquer le paquet vers plusieurs destinations

Combinaisons d'Actions Courantes :

- `Action : 2 (TRANSFÉRER)` - Transfert normal (le plus courant)
- `Action : 6 (TRANSFÉRER + BUFFER)` - Transférer et bufferiser pendant le transfert
- `Action : 4 (BUFFER)` - Bufferiser uniquement (pendant le changement de chemin)
- `Action : 1 (REJETER)` - Rejeter le paquet (rare, généralement pour l'application de politiques)

Contrôle de Bufferisation

Le drapeau BUFFER (bit 2) contrôle la bufferisation des paquets pendant les événements de mobilité. La bufferisation est une fonctionnalité critique du UPF qui empêche la perte de paquets pendant les transitions d'état de l'UE.

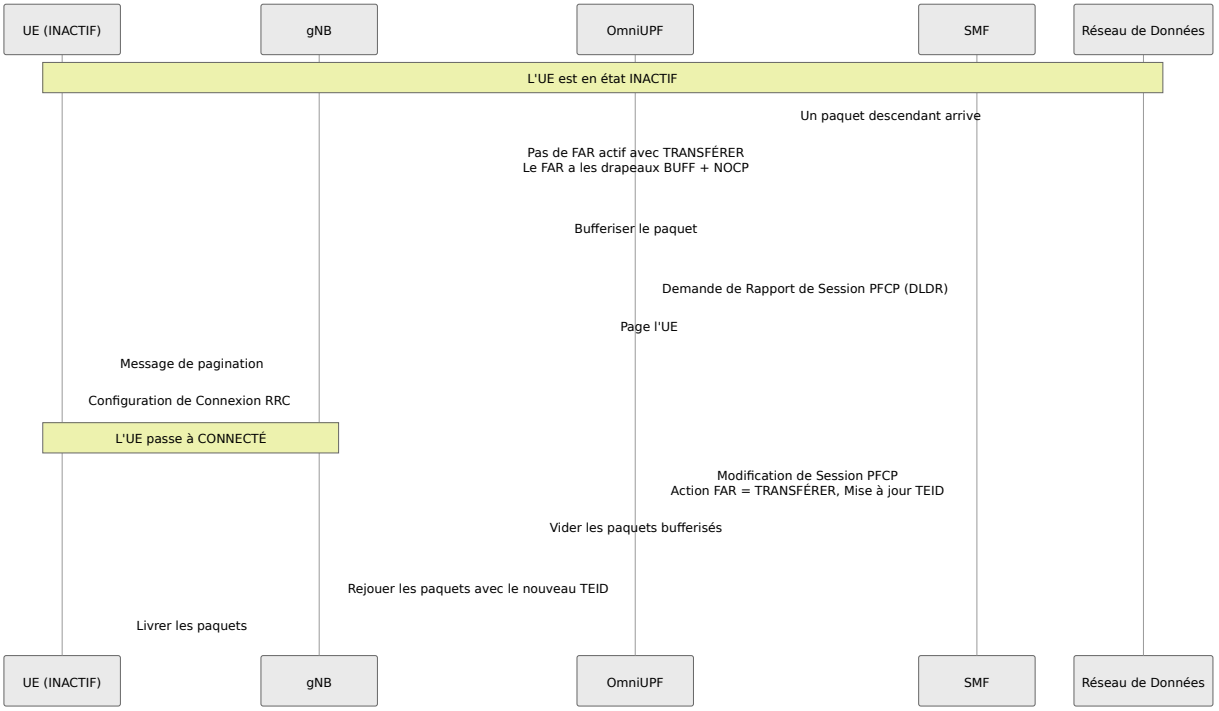
Quand la Bufferisation est Utilisée

Transition Inactif à Connecté : Lorsque des paquets descendants arrivent pour un UE en état INACTIF (non connecté au gNB), le UPF :

1. Bufferise les paquets
2. Envoie une Notification de Données Descendantes (DLDR) au SMF
3. Le SMF page l'UE pour le réveiller et se connecter
4. Une fois connecté, le SMF met à jour le FAR avec l'action TRANSFÉRER
5. Le UPF vide les paquets bufferisés vers l'UE

Transfert (Connecté à Connecté) : Lors du transfert gNB à gNB, le UPF bufferise temporairement les paquets pour éviter la perte :

1. La connexion gNB ancienne est interrompue
2. Le SMF définit l'action FAR sur BUFFER
3. Les paquets sont mis en file d'attente pendant le changement de chemin
4. L'UE se connecte au nouveau gNB
5. Le SMF met à jour le FAR avec le nouveau TEID et l'action TRANSFÉRER
6. Le UPF vide les paquets vers le nouveau gNB



Capacité et Limites de Buffer

Limites Globales de Buffer :

- **Max Total de Paquets** : 100,000 (configurable)
- **Max Total de Bytes** : Basé sur la mémoire disponible
- **TTL (Temps de Vie)** : 60 secondes (configurable)
- **Paquets dépassant le TTL** : Rejetés automatiquement

Limites par FAR :

- **Max Paquets par FAR** : 10,000 (configurable)
- **Objectif** : Empêcher un seul FAR d'épuiser la capacité de buffer

Comportement de Débordement de Buffer :

- Lorsque la limite globale ou par FAR est atteinte, de nouveaux paquets sont rejetés
- Les métriques suivent les rejets avec `reason="global_limit"` ou `reason="far_limit"`
- Les paquets les plus anciens ne sont PAS automatiquement évincés (rejet explicite uniquement à l'expiration du TTL)

Notification de Données Descendantes (DLDR)

Lorsque le UPF bufferise un paquet pour un UE INACTIF, il envoie une Demande de Rapport de Session PFCP au SMF :

Contenu DLDR :

- **Type de Rapport** : Rapport de Données Descendantes (DLDR)
- **ID FAR** : Le FAR qui a déclenché la bufferisation
- **Informations sur le Service de Données Descendantes** : QFI optionnel, Indicateur de Politique de Pagination

Actions du SMF sur DLDR :

1. Pager l'UE via AMF → gNB
2. Attendre que l'UE établisse la connexion RRC
3. Envoyer une Demande de Modification de Session PFCP pour mettre à jour le FAR
4. L'action FAR change de `BUFF+NOCP` à `FORW`

5. Le UPF vide les paquets bufferisés

Métriques pour DLDR :

- `upf_dldr_sent_total` : Total des DLDR envoyés
- `upf_dldr_send_errors` : DLDR échoués
- `upf_buffer_notify_to_flush_duration_seconds` : Latence de DLDR à flush

Voir Référence des Métriques pour la liste complète.

Opérations de Bufferisation

Activer la Bufferisation (Définir le drapeau BUFF) :

- Action FAR `|= 0x04` (définir le bit 2)
- Exemple : `Action : 2 (FORW)` → `Action : 6 (FORW+BUFF)`
- Utilisé lors de la préparation du transfert

Mode Buffer-Only (BUFF sans FORW) :

- Action FAR `= 0x04` (BUFFER uniquement)
- Les paquets sont bufferisés mais NE SONT PAS transférés
- Utilisé pour l'état INACTIF de l'UE (en attente de pagination)

Désactiver la Bufferisation (Effacer le drapeau BUFF) :

- Action FAR `&= ~0x04` (effacer le bit 2)
- Exemple : `Action : 6 (FORW+BUFF)` → `Action : 2 (FORW)`
- Les paquets bufferisés restent jusqu'à ce qu'ils soient vidés ou effacés

Vider le Buffer :

- Rejouer tous les paquets bufferisés en utilisant les règles FAR **actuelles**
- Les paquets sont transférés avec le TEID/destination mis à jour
- Le buffer est vidé après un flush réussi
- Le FAR doit avoir l'action FORW définie

Effacer le Buffer :

- Jeter tous les paquets bufferisés sans transfert
- Utiliser lorsque le transfert échoue ou que la session est supprimée
- Les métriques suivent avec `reason="cleared"`

Surveillance des Paquets Bufferisés

Page des Buffers (Interface Web) : Naviguez vers **Buffers** pour voir :

- Total des paquets bufferisés
- Total des bytes bufferisés
- Nombre de FARs avec des paquets bufferisés
- Comptes de paquets par FAR
- Horodatage du paquet le plus ancien
- Activer/Désactiver la bufferisation par FAR
- Opérations de flush ou d'effacement

Indicateurs Clés :

- **Paquets > 10 secondes** : Délai de pagination potentiel
- **Paquets > 30 secondes** : Échec probable de pagination, effacer le buffer
- **Nombre élevé de paquets** : Vérifier les sessions bloquées ou les échecs de pagination

Métriques Prometheus :

- `upf_buffer_packets_current` : Paquets bufferisés actuels
- `upf_buffer_bytes_current` : Bytes bufferisés actuels
- `upf_buffer_fars_active` : FARs avec des paquets bufferisés
- `upf_buffer_packets_dropped{reason}` : Comptes de paquets rejetés

Voir Référence des Métriques pour la liste complète des métriques de buffer.

Scénarios Courants de Bufferisation

Scénario 1 : UE INACTIF Données Descendantes

```
État Initial :
- UE en mode INACTIF (pas de connexion gNB)
- Action FAR : 0x04 (BUFFER uniquement)

Arrivée de Données :
1. DN envoie un paquet descendant
2. UPF correspond à la PDR, applique le FAR
3. Le FAR a le drapeau BUFFER → paquet bufferisé
4. UPF envoie DLDR au SMF
5. SMF page l'UE
6. L'UE se connecte au gNB
7. SMF modifie le FAR : Action = 0x02 (FORW)
8. UPF vide les paquets bufferisés avec le nouveau TEID
```

Scénario 2 : Préparation au Transfert

```
État Initial :
- UE connecté à gNB-1 (TEID 1234)
- Action FAR : 0x02 (FORW)

Processus de Transfert :
1. SMF modifie le FAR : Action = 0x06 (FORW+BUFF)
2. Les paquets sont transférés à gNB-1 ET bufferisés
3. L'UE passe à gNB-2
4. SMF modifie le FAR : TEID = 5678, Action = 0x02 (FORW)
5. UPF vide les paquets bufferisés vers gNB-2 avec le nouveau TEID
6. Pas de perte de paquets pendant le transfert
```

Scénario 3 : Changement de Chemin

```
État Initial :
- UE connecté, flux de données actif

Changement de Chemin :
1. SMF modifie le FAR : Action = 0x04 (BUFFER uniquement)
2. Tous les paquets entrants sont bufferisés (non transférés)
3. Le réseau reconfigure le chemin
4. SMF modifie le FAR : Action = 0x02 (FORW), nouvelle destination
5. UPF vide tous les paquets bufferisés vers le nouveau chemin
```

Création d'En-tête Externe

Détermine si l'encapsulation GTP-U doit être ajoutée.

FAR Montant (N3 → N6) :

- Création d'En-tête Externe : Faux
- Action : Retirer GTP-U, transférer le paquet IP natif

FAR Descendant (N6 → N3) :

- Création d'En-tête Externe : Vrai
- IP Distant : Adresse IP du gNB (par exemple, 200.198.5.10)
- TEID : ID de tunnel pour le trafic UE
- Action : Ajouter l'en-tête GTP-U, transférer au gNB

Recherche FAR dans l'Interface Web

La page de Gestion des Règles fournit une recherche de FAR par ID :

Étapes :

1. Naviguez vers Règles → Onglet FARs
2. Entrez l'ID FAR dans le champ de recherche
3. Cliquez sur "Rechercher" pour voir les détails du FAR

Informations Affichées :

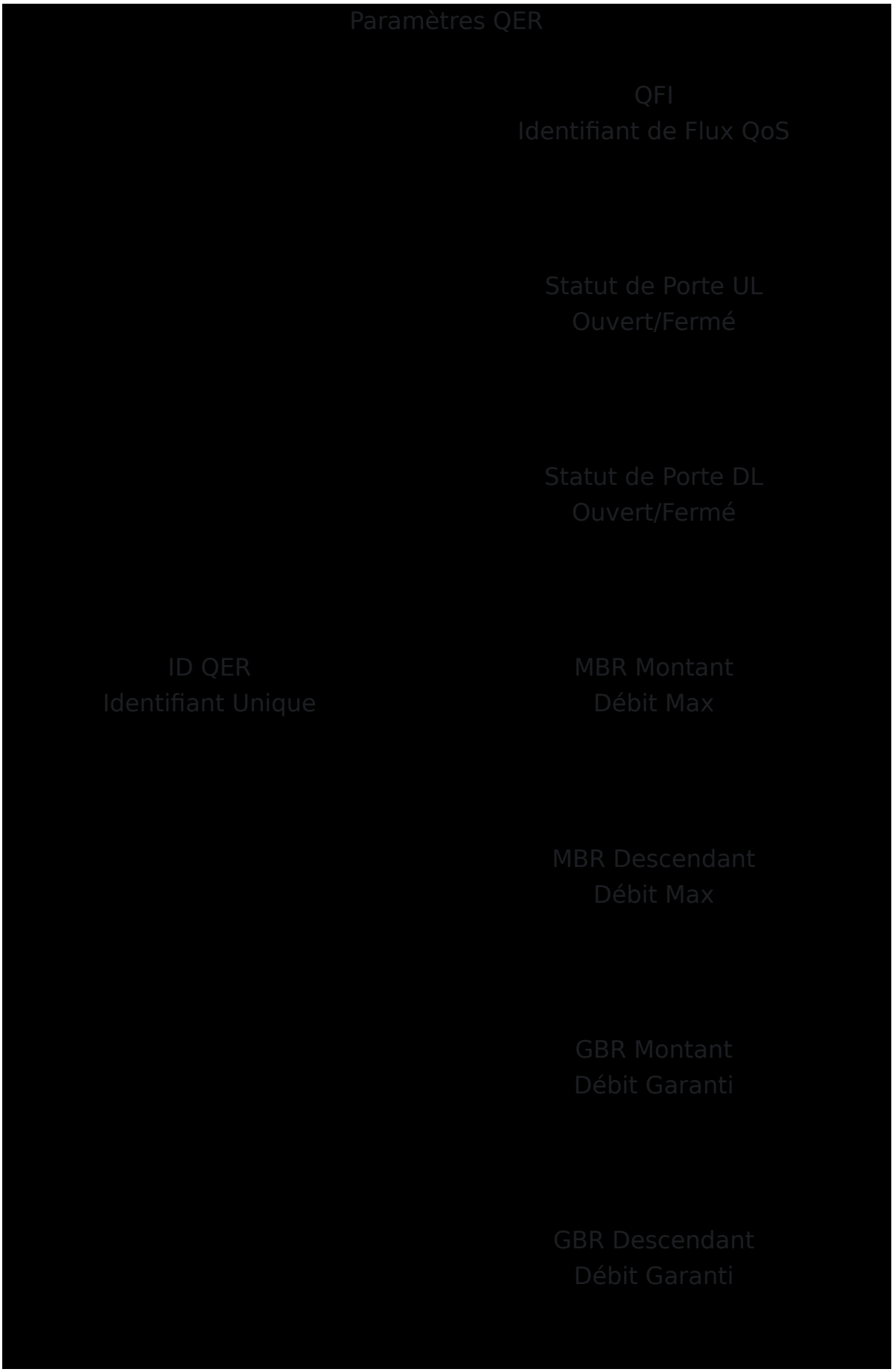
- ID FAR
- Action (numérique + drapeaux décodés)
- Statut de bufferisation (ACTIVÉ/DÉSACTIVÉ)
- Création d'En-tête Externe
- Adresse IP distante (avec représentation entière)
- TEID
- Marquage de Niveau de Transport

Règles d'Application de QoS (QER)

Objectif

Les QER appliquent des paramètres de Qualité de Service aux flux de trafic, y compris des limites de bande passante et le marquage des paquets.

Structure QER


Paramètres QER
QFI
Identifiant de Flux QoS
Statut de Porte UL
Ouvert/Fermé
Statut de Porte DL
Ouvert/Fermé
ID QER
Identifiant Unique
MBR Montant
Débit Max
MBR Descendant
Débit Max
GBR Montant
Débit Garanti
GBR Descendant
Débit Garanti

Paramètres QoS

QFI (Identifiant de Flux QoS) :

- Identifiant de 6 bits pour les flux QoS 5G
- Les valeurs 1-9 sont standardisées (par exemple, QFI 9 = porteuse par défaut)
- Utilisé pour le marquage des paquets dans 5GC

Statut de Porte :

- **Ouvert (0)** : Trafic autorisé
- **Fermé (non zéro)** : Trafic bloqué

Débit Max (MBR) :

- Bande passante maximale autorisée pour le flux de trafic
- Spécifié en kbps
- **MBR = 0** : Pas de limite de débit (illimité)
- Le trafic dépassant le MBR est rejeté

Débit Garanti (GBR) :

- Bande passante minimale garantie pour le flux de trafic
- Spécifié en kbps
- **GBR = 0** : Meilleur effort (pas de garantie)
- **GBR > 0** : Flux priorisé avec bande passante garantie

Types de Flux QoS

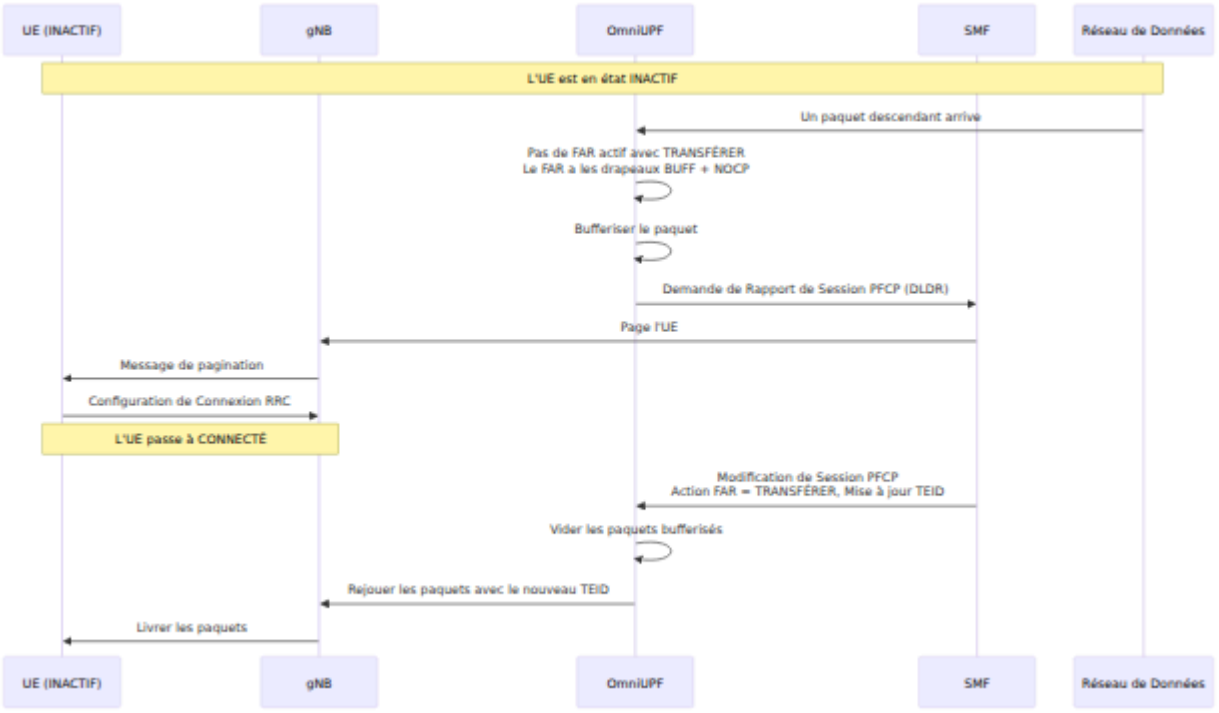
Flux à Meilleur Effort (GBR = 0) :

```
ID QER : 1
QFI : 9
MBR Montant : 100000 kbps (100 Mbps)
MBR Descendant : 100000 kbps (100 Mbps)
GBR Montant : 0 kbps
GBR Descendant : 0 kbps
```

Flux Garantis (GBR > 0) :

```
ID QER : 2
QFI : 1
MBR Montant : 10000 kbps (10 Mbps)
MBR Descendant : 10000 kbps (10 Mbps)
GBR Montant : 5000 kbps (5 Mbps)
GBR Descendant : 5000 kbps (5 Mbps)
```

Algorithme d'Application de QoS



Mécanisme d'Application du MBR

OmniUPF applique les limites MBR (Débit Max) en utilisant un **limiteur de débit à fenêtre glissante** implémenté dans le chemin de données eBPF. Cet algorithme fonctionne avec une précision en nanosecondes directement dans la couche XDP, garantissant des performances à débit ligne sans changements de contexte du noyau.

Comment Cela Fonctionne

Algorithme : Limitation de Débit à Fenêtre Glissante

Pour chaque paquet, le UPF effectue les vérifications suivantes :

1. **Vérification du Statut de la Porte** : Si le statut de la porte est `FERMÉ` (non zéro), rejeter le paquet immédiatement
2. **Vérification du MBR** : Si MBR = 0, contourner la limitation de débit (bande passante illimitée)
3. **Calcul du Temps de Transmission** :

```
tx_time = (packet_size_bytes × 8) × (1,000,000,000 ns/sec) /
MBR_kbps
```

4. **Vérification de la Fenêtre** : Si le temps actuel est dans la fenêtre glissante de 5 ms, rejeter le paquet
5. **Avancement de la Fenêtre** : Si le paquet est autorisé, avancer la fenêtre par `tx_time`

Exemple de Calcul :

Supposons :

- MBR = 100,000 kbps (100 Mbps)
- Taille du paquet = 1500 bytes
- Taille de la fenêtre = 5,000,000 ns (5 ms)

```
Étape 1 : Calculer le temps de transmission à 100 Mbps
tx_time = (1500 bytes × 8 bits/byte) × (1,000,000,000 ns/sec) /
100,000,000 bps
        = 12,000,000,000 / 100,000,000
        = 120 ns

Étape 2 : Vérifier si le paquet s'inscrit dans la fenêtre
current_time = 1000000000 ns
window_start = 999990000 ns
if (window_start + tx_time > current_time):
    REJETER le paquet (dépasserait la limite de débit)

Étape 3 : Si autorisé, avancer la fenêtre
window_start = window_start + 120 ns
PASSER le paquet
```

Comportement de la Fenêtre Glissante

Taille de Fenêtre de 5 ms :

- L'algorithme utilise une fenêtre glissante de 5 millisecondes
- La fenêtre se réinitialise automatiquement si elle est inactive pendant plus de 5 ms

- Empêche la famine de rafales tout en appliquant un taux moyen

Gestion des Rafales :

- De petites rafales sont autorisées dans la fenêtre de 5 ms
- Le trafic soutenu au-dessus du MBR est limité par le débit
- Plus précis que les simples algorithmes de seau à jetons

Limitation de Débit par Direction :

- Le MBR montant utilise le timestamp `qer->ul_start`
- Le MBR descendant utilise le timestamp `qer->dl_start`
- Chaque direction est limitée par le débit indépendamment

Points d'Application de la Limitation de Débit

Montant (N3 → N6) :

1. Le paquet arrive sur l'interface N3 (depuis le gNB)
2. Recherche PDR par TEID
3. Recherche QER par ID QER
4. Vérifier `ul_gate_status` → rejeter si fermé
5. Appliquer `limit_rate_sliding_window()` avec `ul_maximum_bitrate`
6. Si passé, transférer à N6 et mettre à jour les compteurs URR

Descendant (N6 → N3) :

1. Le paquet arrive sur l'interface N6 (depuis le Réseau de Données)
2. Recherche PDR par adresse IP UE
3. Recherche QER par ID QER
4. Vérifier `dl_gate_status` → rejeter si fermé
5. Appliquer `limit_rate_sliding_window()` avec `dl_maximum_bitrate`
6. Si passé, ajouter l'en-tête GTP-U et transférer à N3

Boucle N9 (SGWU ↔ PGWU) :

- Les QERs montants et descendants peuvent s'appliquer dans les scénarios de boucle N9

- Chaque QER est vérifiée indépendamment aux frontières SGWU et PGWU

MBR vs. Débit Observé

Pourquoi le débit observé peut différer du MBR :

- **Surcharge de Protocole** : Les en-têtes GTP-U, UDP, IP ajoutent ~50-60 bytes par paquet
- **Variance de Taille de Paquet** : Paquets plus petits = plus de surcharge, moins d'efficacité
- **Précision de Limitation de Débit** : L'application se fait par paquet, pas par byte
- **Comportement de Réinitialisation de Fenêtre** : Les périodes d'inactivité de 5 ms permettent de brèves rafales au-dessus du MBR

Exemple :

```
MBR Configuré : 100 Mbps
Débit Observé : ~95-98 Mbps (en raison de la surcharge GTP-
U/UDP/IP)
```

Comment Vérifier la Limitation de Débit :

1. Vérifiez les compteurs de volume URR au fil du temps : `upf_urr_*_volume_bytes`
2. Calculez le débit : `(volume_delta_bytes × 8) / time_delta_seconds / 1000` = kbps
3. Comparez avec le MBR configuré dans le QER

GBR (Débit Garanti)

Important : OmniUPF ne fait **pas** actuellement respecter les minimums GBR. Le GBR est stocké dans le QER mais n'est pas utilisé pour la priorisation du trafic ou le contrôle d'admission.

Comportement du GBR :

- Les valeurs GBR sont acceptées du SMF via PFCP

- Le GBR est stocké dans la carte QER et visible via l'API
- **Pas de réservation de bande passante** ou de priorisation du trafic basée sur le GBR
- Le GBR sert de métadonnées pour le suivi du type de flux (meilleur effort vs. garanti)

Amélioration Future :

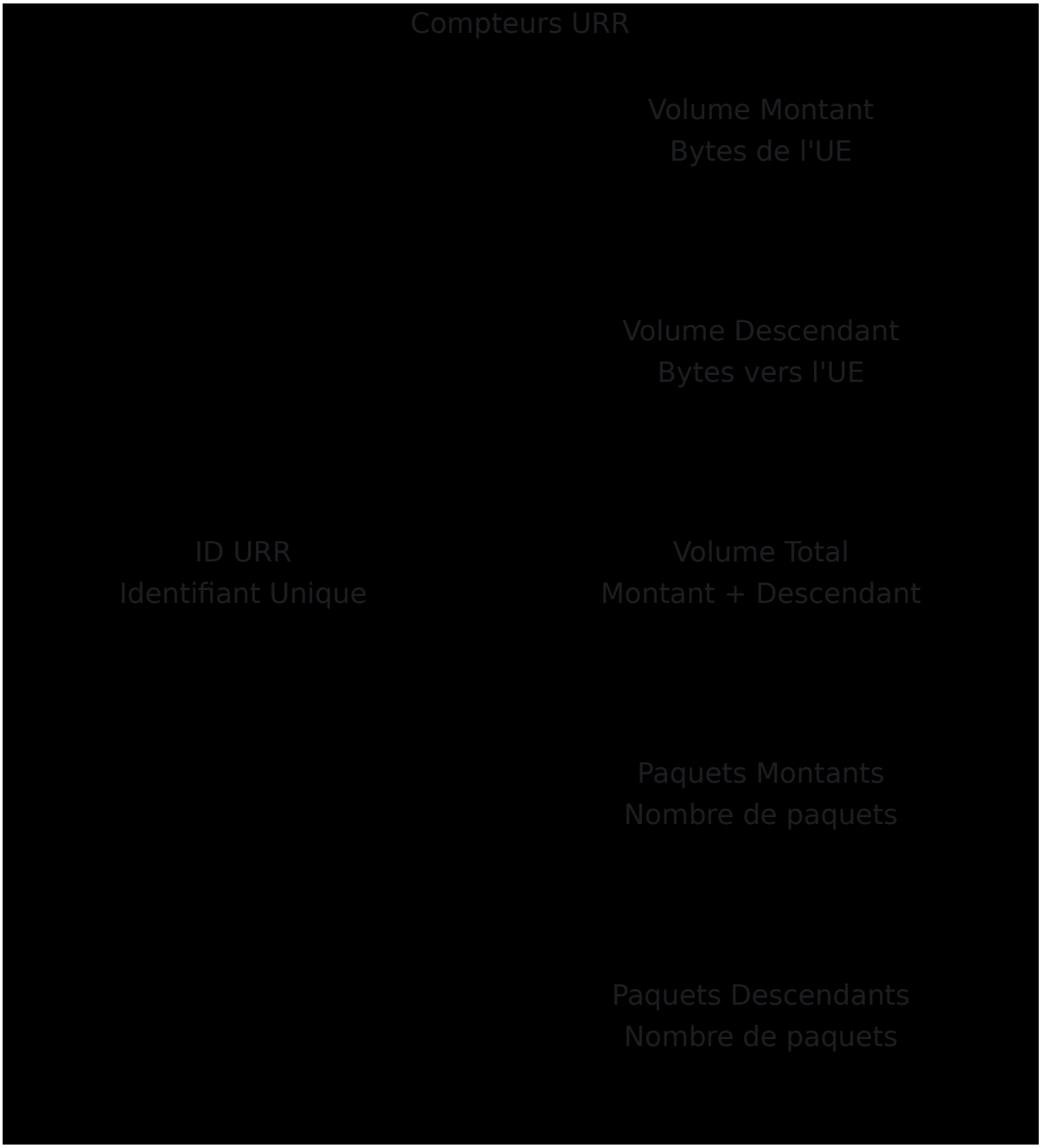
- L'application du GBR nécessite une planification de trafic ou un ordonnancement pondéré
- Peut être implémenté en utilisant les capacités QoS eBPF dans les futures versions

Règles de Rapport d'Utilisation (URR)

Objectif

Les URR suivent les volumes de données pour la facturation, l'analyse et l'application des politiques. Elles maintiennent des compteurs de paquets et de bytes qui sont rapportés au SMF pour les enregistrements de facturation.

Structure URR



Suivi des Volumes

Volume Montant :

- Bytes transmis de l'UE au Réseau de Données
- Mesuré après la décapsulation GTP-U
- Inclut l'en-tête IP et la charge utile

Volume Descendant :

- Bytes transmis du Réseau de Données à l'UE
- Mesuré avant l'encapsulation GTP-U
- Inclut l'en-tête IP et la charge utile

Volume Total :

- Somme des volumes montant et descendant
- Utilisé pour le rapport d'utilisation total

Déclencheurs de Rapport d'Utilisation

Les URR peuvent déclencher des rapports basés sur :

Seuil de Volume :

- Rapport lorsque le volume dépasse la limite configurée
- Exemple : Rapport chaque 1 Go d'utilisation

Seuil de Temps :

- Rapport à des intervalles périodiques
- Exemple : Rapport toutes les 5 minutes

Basé sur Événements :

- Rapport à la terminaison de session
- Rapport sur changement de QoS
- Rapport sur transfert

Formatage d'Affichage des Volumes

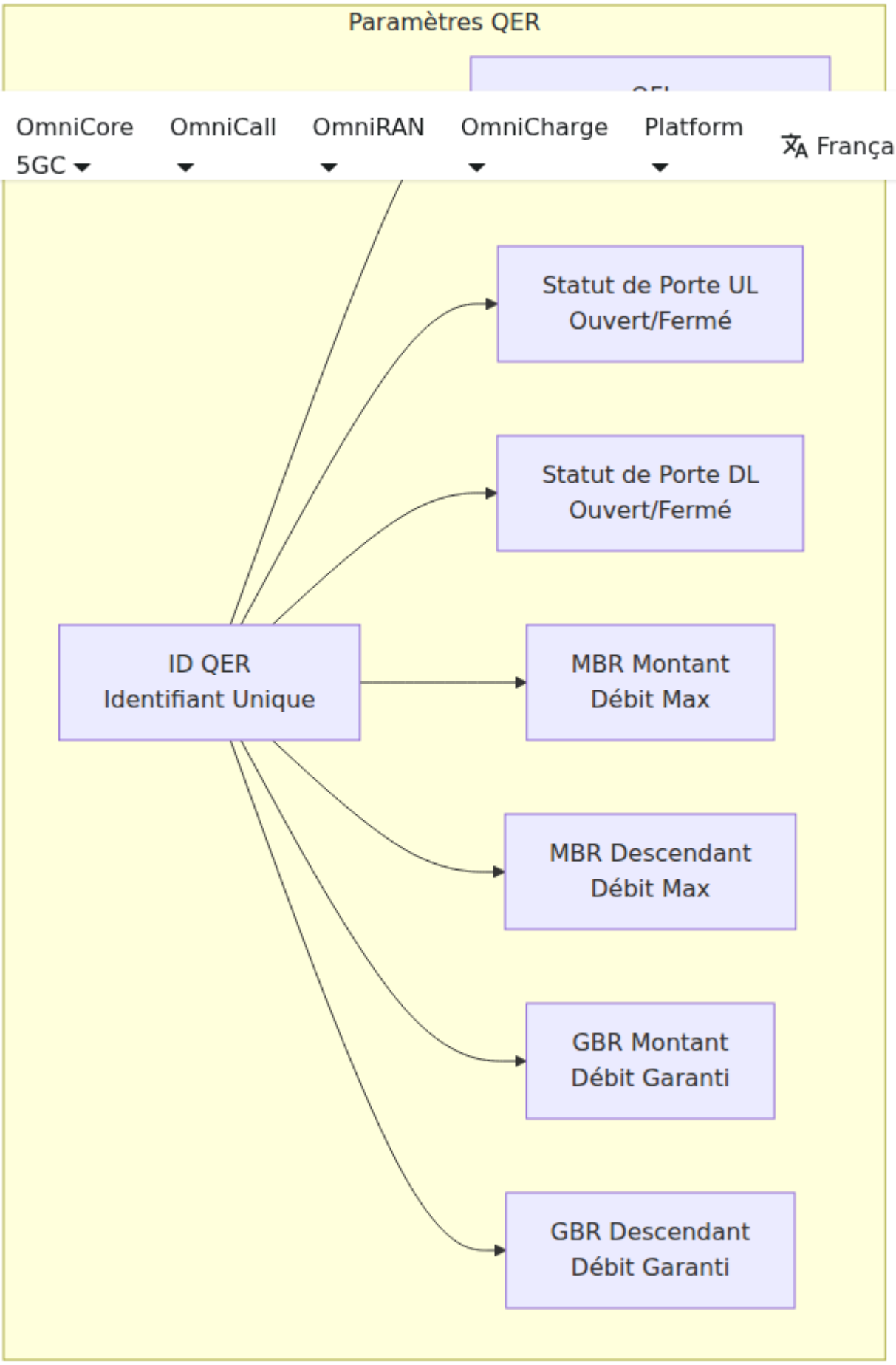
L'interface Web formate automatiquement le volume en unités lisibles par l'homme :

Bytes	Affichage
0 - 1023	B (Bytes)
1024 - 1048575	KB (Kilobytes)
1048576 - 1073741823	MB (Megabytes)
1073741824 - 1099511627775	GB (Gigabytes)
1099511627776+	TB (Terabytes)

Exemple :

```
ID URR : 0
Volume Montant : 12.3 KB
Volume Descendant : 9.0 KB
Volume Total : 21.3 KB
```

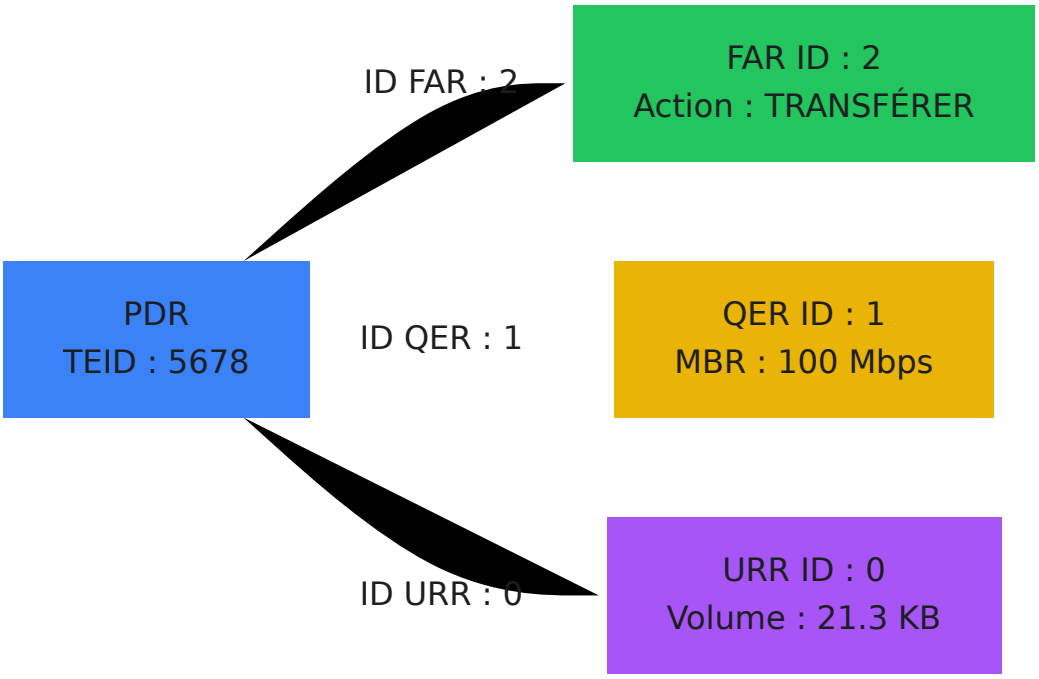
Flux de Rapport URR


Paramètres QER
OmniCore 5GC
OmniCall
OmniRAN
OmniCharge
Platform
França
Statut de Porte UL
Ouvert/Fermé
Statut de Porte DL
Ouvert/Fermé
ID QER
Identifiant Unique
MBR Montant
Débit Max
MBR Descendant
Débit Max
GBR Montant
Débit Garanti
GBR Descendant
Débit Garanti

Relations entre Règles

Chaîne PDR → FAR → QER → URR

Chaque PDR référence un FAR, qui peut référencer un QER et un ou plusieurs URRs.



Exemple de Configuration de Session

PDR Montant :

```
TEID : 5678
ID FAR : 2
ID QER : 1
IDs URR : [0]
Suppression de l'En-tête Externe : Faux
```

PDR Descendant :

```
IP UE : 10.45.0.1
ID FAR : 1
ID QER : 1
IDs URR : [0]
Mode SDF : Pas de SDF
```

ID FAR 1 (Descendant) :

```
Action : 2 (TRANSFÉRER)
Création d'En-tête Externe : Vrai
IP Distant : 200.198.5.10
TEID : 5678
```

ID FAR 2 (Montant) :

```
Action : 2 (TRANSFÉRER)
Création d'En-tête Externe : Faux
```

ID QER 1 :

```
QFI : 9
MBR Montant : 100000 kbps
MBR Descendant : 100000 kbps
GBR Montant : 0 kbps
GBR Descendant : 0 kbps
```

ID URR 0 :

```
Volume Montant : 12.3 KB
Volume Descendant : 9.0 KB
Volume Total : 21.3 KB
```

Opérations Courantes

Voir les Règles pour une Session

Via la Page des Sessions :

1. Naviguez vers Sessions
2. Trouvez l'UE par IP ou TEID
3. Cliquez sur "Développer" pour voir toutes les règles (PDR, FAR, QER, URR)

Via la Page des Règles :

1. Naviguez vers Règles
2. Utilisez la recherche par TEID (montant) ou IP UE (descendant) dans l'onglet PDR
3. Notez l'ID FAR, l'ID QER, les IDs URR
4. Passez aux onglets FAR/QER/URR pour voir les règles référencées

Activer/Désactiver la Bufferisation

Scénario : Pendant le transfert, bufferiser les paquets pour éviter la perte

Étapes :

1. Naviguez vers Règles → FARs
2. Entrez l'ID FAR dans le champ de recherche
3. Cliquez sur "Rechercher"
4. Si la bufferisation est DÉSACTIVÉE, cliquez sur "Activer la Bufferisation"
5. Vérifiez que le bit 2 de l'action FAR est défini (la valeur de l'action augmente de 4)

Alternative via la Page des Buffers :

1. Naviguez vers Buffers
2. Voir les FARs avec la bufferisation activée
3. Cliquez sur "Désactiver le Buffer" lorsque le transfert est terminé

Surveiller la Conformité QoS

Vérifiez si le trafic est limité par le débit :

1. Naviguez vers Règles → QERs
2. Trouvez l'ID QER associé à la session UE
3. Notez les valeurs MBR Montant et MBR Descendant
4. Comparez avec le taux de croissance du volume URR

Calculer le Débit Moyen :

```
Débit (kbps) = (Delta de Volume en bytes × 8) / (Delta de Temps en secondes × 1000)
```

Si le débit approche le MBR, le trafic est limité par le débit.

Suivre l'Utilisation des Données

Surveillez les volumes URR :

1. Naviguez vers Règles → URRs
2. Voir les volumes montant, descendant et total
3. Trier par Volume Total pour trouver les utilisateurs les plus élevés
4. Actualiser périodiquement pour observer la croissance du volume

Cas d'Utilisation :

- Vérifier l'intégration de la facturation
- Détecter une utilisation anormale des données
- Planifier la capacité en fonction des modèles de trafic

Dépannage

Aucun Trafic ne Circule

Vérifiez la PDR :

1. Vérifiez que la PDR existe pour le TEID (montant) ou l'IP UE (descendant)
2. Confirmez que l'ID FAR est valide
3. Vérifiez que les filtres SDF ne bloquent pas le trafic

Vérifiez la FAR :

1. Vérifiez que l'action FAR est TRANSFÉRER (pas REJETER ou BUFFER uniquement)
2. Confirmez que la création d'en-tête externe correspond à la direction
3. Vérifiez que l'IP Distant et le TEID sont corrects pour le descendant

Vérifiez la QER :

1. Vérifiez que le Statut de la Porte est Ouvert (0)
2. Vérifiez que le MBR n'est pas trop restrictif

Paquets Rejetés

Vérifiez la Limitation de Débit QER :

1. Naviguez vers Règles → QERs
2. Vérifiez que le MBR est adéquat pour la charge de trafic
3. Vérifiez que la croissance du volume URR correspond au débit attendu

Vérifiez l'Action FAR :

1. Naviguez vers Règles → FARs
2. Vérifiez que l'action est TRANSFÉRER, pas REJETER
3. Vérifiez que la bufferisation n'est pas bloquée en mode BUFFER uniquement

Problèmes de Bufferisation

Paquets bloqués dans le buffer :

1. Naviguez vers la page des Buffers
2. Vérifiez l'horodatage du paquet le plus ancien
3. Si > 30 secondes, le transfert peut avoir échoué

4. Videz manuellement ou effacez le buffer
5. Désactivez la bufferisation sur le FAR

Débordement de Buffer :

1. Vérifiez le nombre total de paquets par rapport à Max Total (par défaut 100,000)
2. Vérifiez les paquets par FAR par rapport à Max Par FAR (par défaut 10,000)
3. Effacez les buffers si pleins
4. Enquêtez sur la raison pour laquelle la bufferisation n'a pas été désactivée

URR ne Suivant Pas

Compteurs de volume à zéro :

1. Vérifiez que la PDR référence l'ID URR
2. Vérifiez que les paquets correspondent à la PDR
3. Vérifiez que le FAR transfère (pas de rejet) les paquets
4. Confirmez que l'ID URR existe dans la carte URR

Volume ne rapportant pas au SMF :

1. Vérifiez la configuration du Rapport de Session PFCP
2. Vérifiez les déclencheurs de rapport URR (seuils de volume/temps)
3. Passez en revue les journaux pour les messages de Rapport de Session PFCP

Documentation Connexe

- **Guide d'Opérations UPF** - Aperçu de l'architecture et des composants d'OmniUPF
- **Guide d'Opérations de l'Interface Web** - Utilisation du panneau de contrôle pour la visualisation des règles
- **Guide de Surveillance** - Statistiques et surveillance de la capacité
- **Guide de Dépannage** - Problèmes courants et diagnostics

OmniUPF Guide de Dépannage

Table des Matières

Aperçu

Ce guide fournit des procédures de dépannage systématiques pour les problèmes courants d'OmniUPF. Chaque section comprend des symptômes, des étapes de diagnostic, des causes profondes et des procédures de résolution.

Liste de Contrôle de Diagnostic Rapide

Avant un dépannage approfondi, v��rifiez :

```
# 1. Vérifiez qu'OmniUPF fonctionne
systemctl status omniupf

# 2. Vérifiez l'association PFCP
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_pipeline

# 3. Vérifiez que les cartes eBPF sont chargées
ls /sys/fs/bpf/

# 4. Vérifiez que le programme XDP est attaché
ip link show | grep -i xdp

# 5. Vérifiez les journaux du noyau pour les erreurs
dmesg | tail -50
journalctl -u omniupf -n 50
```

Outils de Diagnostic

API REST OmniUPF

Vérifiez l'état du UPF :

```
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_status
```

Vérifiez les associations PFCP :

```
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_pipeline
```

Vérifiez le nombre de sessions :

```
curl http://localhost:8080/api/v1/sessions | jq 'length'
```

Vérifiez la capacité de la carte eBPF :

```
curl http://localhost:8080/api/v1/map_info
```

Vérifiez les statistiques des paquets :

```
curl http://localhost:8080/api/v1/packet_stats
```

Vérifiez les statistiques XDP :

```
curl http://localhost:8080/api/v1/xdp_stats
```

Inspection de la Carte eBPF

Listez toutes les cartes eBPF :

```
ls -lh /sys/fs/bpf/
bpftool map list
```

Affichez les détails de la carte :

```
bpftool map show
bpftool map dump name pdr_map_downlin
```

Comptez les entrées dans la carte :

```
bpftool map dump name far_map | grep -c "key:"
```

Inspection du Programme XDP

Vérifiez si le programme XDP est attaché :

```
ip link show eth0 | grep xdp
```

Listez tous les programmes XDP :

```
bpftool net list
```

Affichez les détails du programme XDP :

```
bpftool prog show
```

Dump des statistiques XDP :

```
bpftool prog dump xlated name xdp_upf_func
```

Débogage Réseau

Capturez le trafic PFCP sur N4 (plan de contrôle) :

```
# PFCP n'est pas traité par XDP, tcpdump fonctionne normalement
tcpdump -i eth0 -n udp port 8805 -w /tmp/pfcp_traffic.pcap
```

Capturez le trafic GTP-U sur N3 (nécessite une capture hors bande) :

```
# AVERTISSEMENT : Le tcpdump standard sur l'hôte UPF NE PEUT PAS
capturer les paquets traités par XDP !
# XDP traite GTP-U avant que la pile réseau du noyau ne voie les
paquets.

# Utilisez plutôt une capture hors bande :
# 1. TAP réseau entre gNB et UPF
# 2. Miroir de port de commutateur/SPAN pour copier le trafic N3
# 3. Miroir de port de commutateur virtuel vers VM d'analyse

# Sur l'hôte d'analyse/de surveillance (PAS sur UPF) :
# tcpdump -i <mirror_interface> -n udp port 2152 -w
/tmp/n3_capture.pcap

# Ou utilisez l'API de statistiques pour les comptes de paquets :
curl http://localhost:8080/api/v1/packet_stats
curl http://localhost:8080/api/v1/n3n6_stats
```

Surveillez les compteurs de paquets :

```
watch -n 1 'ip -s link show eth0'
```

Vérifiez la table de routage :

```
ip route show
ip route get 10.45.0.100  # Vérifiez la route pour l'IP UE
```

Vérifiez la table ARP :

```
ip neigh show
```

Problèmes d'Installation

Problème : "système de fichiers eBPF non monté"

Symptômes :

```
ERRO[0000] échec du chargement des objets eBPF : monter le système
de fichiers bpf à /sys/fs/bpf
```

Cause : système de fichiers eBPF non monté

Résolution :

```
# Monter le système de fichiers eBPF
sudo mount bpffs /sys/fs/bpf -t bpf

# Rendre persistant (ajouter à /etc/fstab)
echo "bpffs /sys/fs/bpf bpf defaults 0 0" | sudo tee -a /etc/fstab

# Vérifiez le montage
mount | grep bpf
```

Problème : Version du noyau trop ancienne

Symptômes :

```
ERRO[0000] la version du noyau 5.4.0 est trop ancienne, la version
minimale requise est 5.15.0
```

Cause : version du noyau Linux inférieure à l'exigence minimale

Résolution :

```
# Vérifiez la version du noyau
uname -r

# Mettez à niveau le noyau (Ubuntu/Debian)
sudo apt update
sudo apt install linux-generic-hwe-22.04
sudo reboot

# Vérifiez le nouveau noyau
uname -r  # Devrait être >= 5.15.0
```

Problème : Dépendance libbpf manquante

Symptômes :

```
error while loading shared libraries: libbpf.so.0: cannot open
shared object file
```

Cause : bibliothèque libbpf non installée

Résolution :

```
# Installer libbpf (Ubuntu/Debian)
sudo apt update
sudo apt install libbpf-dev

# Vérifiez l'installation
ldconfig -p | grep libbpf
```

Problèmes de Configuration

Problème : Fichier de configuration invalide

Symptômes :

```
ERRO[0000] impossible de lire le fichier de configuration :
erreurs de désérialisation
```

Cause : erreur de syntaxe YAML dans le fichier de configuration

Résolution :

```
# Validez la syntaxe YAML
cat config.yml | python3 -c "import yaml, sys;
yaml.safe_load(sys.stdin)"

# Problèmes courants :
# - Indentation incorrecte (utilisez des espaces, pas des
tabulations)
# - Deux-points manquants après les clés
# - Chaînes non citées avec des caractères spéciaux
# - Éléments de liste sans tirets

# Exemple de YAML correct :
cat > config.yml <<EOF
interface_name: [eth0]
xdp_attach_mode: generic
api_address: :8080
pfcp_address: :8805
EOF
```

Problème : Nom de l'interface introuvable

Symptômes :

```
ERRO[0000] interface eth0 introuvable
```

Cause : l'interface configurée n'existe pas

Résolution :

```
# Listez toutes les interfaces réseau
ip link show

# Vérifiez l'état de l'interface
ip addr show eth0

# Si l'interface a un nom différent, mettez à jour config.yml :
interface_name: [ens1f0]  # Utilisez le nom réel de l'interface

# Pour les VM, vérifiez le schéma de nommage des interfaces
ls /sys/class/net/
```

Problème : Port déjà utilisé

Symptômes :

```
ERRO[0000] échec du démarrage du serveur API : adresse déjà
utilisée
```

Cause : le port 8080, 8805 ou 9090 est déjà lié par un autre processus

Résolution :

```
# Trouvez le processus utilisant le port
sudo lsof -i :8080
sudo netstat -tulpn | grep :8080

# Tuez le processus en conflit
sudo kill <PID>

# Ou changez le port d'OmniUPF dans la configuration
api_address: :8081
pfcp_address: :8806
metrics_address: :9091
```

Problème : ID de nœud PFCP invalide

Symptômes :

```
ERRO[0000] id de nœud pfcp invalide : doit être une adresse IPv4
valide
```

Cause : l'ID de nœud PFCP n'est pas une adresse IPv4 valide

Résolution :

```
# Correct : Utilisez une adresse IP (pas un nom d'hôte)
pfcp_node_id: 10.100.50.241

# Incorrect :
# pfcp_node_id: localhost
# pfcp_node_id: upf.example.com
```

Problèmes d'Association PFCP

Problème : Aucune association PFCP établie

Symptômes :

- L'interface Web affiche "Aucune association"
- Les journaux SMF montrent "Échec de l'établissement de l'association PFCP"

Diagnostic :

```
# 1. Vérifiez si le serveur PFCP écoute
sudo netstat -ulpn | grep 8805

# 2. Vérifiez les règles du pare-feu
sudo iptables -L -n | grep 8805
sudo ufw status

# 3. Capturez le trafic PFCP
tcpdump -i any -n udp port 8805 -vv

# 4. Vérifiez les associations PFCP via l'API
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_pipeline
```

Causes et Résolutions Courantes :

Pare-feu bloquant PFCP

Résolution :

```
# Autorisez le trafic PFCP (UDP 8805)
sudo ufw allow 8805/udp
sudo iptables -A INPUT -p udp --dport 8805 -j ACCEPT
```

Mauvais ID de nœud PFCP

Résolution :

```
# Définissez l'ID de nœud PFCP sur l'IP correcte de l'interface N4
pfcp_node_id: 10.100.50.241  # Doit correspondre à l'IP sur le réseau N4
```

Réseau inaccessible au SMF

Résolution :

```
# Testez la connectivité au SMF
ping <SMF_IP>

# Vérifiez le routage vers le SMF
ip route get <SMF_IP>

# Ajoutez une route si manquante
sudo ip route add <SMF_NETWORK>/24 via <GATEWAY>
```

SMF configuré avec une mauvaise IP UPF

Résolution :

- Vérifiez la configuration du SMF pour l'adresse UPF
- Assurez-vous que le SMF a configuré l'IP `pfcp_node_id` de l'UPF
- Vérifiez que le SMF peut router vers le réseau N4 de l'UPF

Problème : Échecs de battement PFCP

Symptômes :

```
WARN[0030] délai d'attente de battement PFCP pour l'association
10.100.50.10
```

Diagnostic :

```
# Vérifiez les statistiques PFCP
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_pipeline | jq
'.associations[] | {remote_id, uplink_teid_count}'

# Surveillez les journaux de battement
journalctl -u omniupf -f | grep heartbeat
```

Causes et Résolutions :

Perte de paquets réseau

Résolution :

```
# Vérifiez la perte de paquets vers le SMF
ping -c 100 <SMF_IP> | grep loss

# Si perte élevée, enquêtez sur le réseau :
# - Vérifiez l'état du lien
# - Vérifiez la santé du commutateur/routeur
# - Vérifiez la congestion
```

Intervalle de battement trop agressif

Résolution :

```yaml
# Augmentez l'intervalle de battement
heartbeat_interval: 30  # Augmentez de 5 à 30 secondes
heartbeat_retries: 5    # Augmentez les tentatives
heartbeat_timeout: 10   # Augmentez le délai d'attente
```

Problèmes de Traitement des Paquets

Problème : Aucun paquet ne circule (compteurs RX/TX à 0)

Symptômes :

- La page des statistiques affiche 0 paquets RX/TX
- L'UE ne peut pas établir de session de données

Diagnostic :

```
# 1. Vérifiez si le programme XDP est attaché
ip link show eth0 | grep xdp

# 2. Vérifiez que l'interface est UP
ip link show eth0

# 3. Vérifiez les statistiques des paquets (sensible à XDP)
# Remarque : tcpdump ne peut pas voir les paquets GTP-U traités
par XDP
curl http://localhost:8080/api/v1/packet_stats
```

Résolutions :

Programme XDP non attaché

Résolution :

```
# Redémarrez OmniUPF pour réattacher XDP
sudo systemctl restart omniupf

# Vérifiez l'attachement
ip link show eth0 | grep xdp
bpftool net list
```

Interface hors service ou pas de lien

Résolution :

```
# Mettez l'interface en marche
sudo ip link set eth0 up

# Vérifiez l'état du lien
ethtool eth0 | grep "Link detected"

# Si le lien est hors service, vérifiez la connexion physique ou
la configuration réseau de la VM
```

Mauvaise interface configurée

Résolution :

```
# Mettez à jour config.yml avec l'interface correcte
interface_name: [ens1f0]  # Utilisez le nom réel de l'interface
depuis 'ip link show'
```

Probl��me : Paquets reçus mais non transférés (taux de perte élevé)

Symptômes :

- Les compteurs RX augmentent mais les compteurs TX non
- Taux de perte > 1 %

Diagnostic :

```
# Vérifiez les statistiques de perte
curl http://localhost:8080/api/v1/xdp_stats | jq '.drop'

# Vérifiez les statistiques de routage
curl http://localhost:8080/api/v1/packet_stats | jq '.route_stats'

# Surveillez les pertes de paquets
watch -n 1 'curl -s http://localhost:8080/api/v1/packet_stats | jq
".total_rx, .total_tx, .total_drop"'
```

Causes Courantes :

Pas de correspondance PDR (TEID ou IP UE inconnus)

Résolution :

```
# Vérifiez si des sessions existent
curl http://localhost:8080/api/v1/sessions

# Si aucune session, vérifiez :
# - L'association PFCP est établie
# - Le SMF a créé des sessions
# - L'établissement de session a réussi

# Vérifiez les entrées de la carte PDR
bpftool map dump name pdr_map_teid_ip | grep -c key
bpftool map dump name pdr_map_downlin | grep -c key
```

Échecs de routage

Résolution :

```
# Vérifiez les échecs de recherche FIB
curl http://localhost:8080/api/v1/packet_stats | jq '.route_stats'

# Testez le routage pour l'IP UE
ip route get 10.45.0.100

# Ajoutez une route manquante
sudo ip route add 10.45.0.0/16 dev eth1  # Route UE vers N6
```

Limitation de débit QER

Symptômes :

- Débit inférieur à celui attendu
- Trafic limité à un taux spécifique
- Les compteurs de volume URR montrent un comportement de plateau
- Les compteurs de perte XDP augmentent pendant les pics de trafic

Diagnostic :

1. **Vérifiez le MBR configuré pour la session** :

```
# Trouvez l'ID QER de la session
curl http://localhost:8080/api/v1/pfcp_sessions | jq '.data[] |
select(.ue_ip == "10.45.0.1")'

# Recherchez la configuration QER
curl http://localhost:8080/api/v1/qer_map | jq '.data[] |
select(.qer_id == 1)'
```

2. **Vérifiez l'état de la porte** :

```
# L'état de la porte doit être 0 (OUVERTE) pour les liaisons
montantes et descendantes
curl http://localhost:8080/api/v1/qer_map | jq '.data[] |
{qer_id, ul_gate: .ul_gate_status, dl_gate: .dl_gate_status}'
```

3. **Calculez le débit réel à partir de l'URR** :

```
# Interrogez les compteurs de volume URR à deux moments
curl http://localhost:8080/api/v1/urr_map | jq '.data[] |
select(.urr_id == 0)'

# Calculez le débit (manuel) :
# throughput_kbps = (volume_delta_bytes × 8) /
time_delta_seconds / 1000
```

4. **Comparez MBR vs. débit réel** :
    - Débit attendu ≈ 95-98 % du MBR (en raison de la surcharge du protocole)
    - Si le débit est significativement inférieur au MBR, vérifiez d'autres goulets d'étranglement
    - Si le débit correspond exactement au MBR, la limitation de débit fonctionne comme prévu

Résolution :

- **Si le MBR est trop bas** : Demandez au SMF de mettre à jour le QER avec un MBR plus élevé via la modification de session PFCP

- **Si la porte est fermée** : Enquêtez sur les raisons pour lesquelles le SMF a fermé la porte (politique, quota ou erreur)
- **Si la limitation de débit est inattendue** : Vérifiez la configuration de la politique SMF et le profil QoS

Comprendre l'Application du MBR :

OmniUPF utilise un algorithme de fenêtre glissante pour appliquer les limites de MBR avec une précision nanoseconde dans le chemin de données eBPF. Voir Guide de Gestion des Règles - Mécanisme d'Application du MBR pour une explication détaillée de :

- Comment la taille et le taux des paquets déterminent les décisions de perte
- Pourquoi le débit observé diffère du MBR configuré
- Limitation de débit par direction (montante/descendante)
- Comportement de la fenêtre glissante de 5 ms

Scénarios Courants :

- **Appels VoIP coupés** : Vérifiez si le MBR est suffisant pour le débit du codec (G.711 = ~80 kbps)
- **Mise en mémoire tampon de streaming vidéo** : Assurez-vous que le MBR > débit vidéo + surcharge (1080p = ~5-10 Mbps)
- **Trafic de pointe** : Petits pics autorisés dans la fenêtre de 5 ms, le trafic soutenu est limité par le taux

---

Problème : Trafic unidirectionnel (la liaison montante fonctionne, la liaison descendante ne fonctionne pas)

Symptômes :

- Paquets RX N3 mais aucun paquet TX N3 (problème de liaison descendante)
- Paquets RX N6 mais aucun paquet TX N6 (problème de liaison montante)

Diagnostic :

```
# Vérifiez les statistiques des interfaces N3/N6 (méthode sensible
à XDP)
curl http://localhost:8080/api/v1/n3n6_stats
curl http://localhost:8080/api/v1/packet_stats

# Remarque : le tcpdump standard ne peut pas capturer le trafic
GTP-U traité par XDP
# Utilisez l'API de statistiques ou xdpdump pour l'analyse du
trafic
# Voir la section "Capture de Paquets avec XDP" pour plus de
détails
```

Échec de la liaison montante (RX N3, pas de TX N6) :

Cause : Pas d'action FAR ou problème de routage vers N6

Résolution :

```
# Vérifiez que le FAR a une action FORWARD
curl http://localhost:8080/api/v1/sessions | jq '.[].fars[] |
select(.applied_action == 2)'

# Vérifiez que la route N6 existe
ip route get 8.8.8.8  # Testez la route vers Internet

# Ajoutez une route par d��faut si manquante
sudo ip route add default via <N6_GATEWAY> dev eth1
```

Échec de la liaison descendante (RX N6, pas de TX N3) :

Cause : Pas de PDR de liaison descendante ou encapsulation GTP manquante

Résolution :

```
# Vérifiez si un PDR de liaison descendante existe pour l'IP UE
curl http://localhost:8080/api/v1/sessions | jq '.[].pdrs[] |
select(.pdi.ue_ip_address)'

# Vérifiez que le FAR a une CRÉATION_D'EN-TÊTE_EXTÉRIEURE
curl http://localhost:8080/api/v1/sessions | jq '.[].fars[] |
.outer_header_creation'

# Vérifiez la connectivité gNB
ping <GNB_N3_IP>
```

Problèmes XDP et eBPF

Pour des instructions détaillées sur la configuration XDP, la sélection de mode et le dépannage, voir le Guide des Modes XDP.

Problème : Échec du chargement du programme XDP

Symptômes :

```
ERRO[0000] échec du chargement du programme XDP : argument
invalide
```

Diagnostic :

```
# Vérifiez le support XDP du noyau
grep XDP /boot/config-$(uname -r)

# Devrait afficher :
# CONFIG_XDP_SOCKETS=y
# CONFIG_BPF=y
# CONFIG_BPF_SYSCALL=y

# Vérifiez dmesg pour une erreur détaillée
dmesg | grep -i bpf
```

Causes et Résolutions :

Le noyau manque de support XDP

Résolution :

```
# Reconstruisez le noyau avec le support XDP ou mettez à niveau
vers un noyau plus récent
# Ubuntu 22.04+ a XDP activé par défaut
sudo apt install linux-generic-hwe-22.04
sudo reboot
```

Échec de vérification du programme XDP

Résolution :

```
# Vérifiez les journaux d'OmniUPF pour les erreurs de vérificateur
journalctl -u omniupf | grep verifier

# Problèmes courants :
# - La complexité eBPF dépasse les limites (augmentez les limites
du noyau)
# - Accès mémoire invalide (bug dans le code eBPF)

# Augmentez le niveau de journalisation du vérificateur eBPF pour
le débogage
sudo sysctl kernel.bpf_stats_enabled=1
```

Problème : Compte des abandons XDP en augmentation

Symptômes :

- Les statistiques XDP montrent des abandons > 0
- Augmentation des pertes de paquets

Diagnostic :

```
# Vérifiez le compte des abandons XDP
curl http://localhost:8080/api/v1/xdp_stats | jq '.aborted'

# Surveillez les statistiques XDP
watch -n 1 'curl -s http://localhost:8080/api/v1/xdp_stats'
```

Cause : le programme eBPF a rencontré une erreur d'exécution

Résolution :

```
# Vérifiez les journaux du noyau pour les erreurs eBPF
dmesg | grep -i bpf

# Redémarrez OmniUPF pour recharger le programme eBPF
sudo systemctl restart omniupf

# Si le problème persiste, activez la journalisation eBPF
(nécessite une reconstruction) :
# Construisez OmniUPF avec BPF_ENABLE_LOG=1
```

Problème : Carte eBPF pleine (capacité épuisée)

Symptômes :

- Établissement de session échoue
- Capacité de la carte à 100 %

Diagnostic :

```
# Vérifiez la capacité de la carte
curl http://localhost:8080/api/v1/map_info | jq '.[] | {map_name,
capacity, used, usage_percent}'

# Identifiez les cartes pleines
curl http://localhost:8080/api/v1/map_info | jq '.[] |
select(.usage_percent > 90)'
```

Atténuation Immédiate :

```
# 1. Identifiez les sessions obsolètes
curl http://localhost:8080/api/v1/sessions | jq '.[] | {seid,
uplink_teid, created_at}'

# 2. Demandez au SMF de supprimer les anciennes sessions
# (via l'interface d'administration SMF ou API)

# 3. Surveillez la diminution de l'utilisation de la carte
watch -n 5 'curl -s http://localhost:8080/api/v1/map_info | jq ".
[] | select(.map_name==\"pdr_map_downlin\") | .usage_percent"'
```

Résolution à Long Terme :

```
# Augmentez la capacité de la carte dans config.yml
max_sessions: 200000  # Augmentez de 100000

# Ou définissez les tailles individuelles des cartes
pdr_map_size: 400000
far_map_size: 400000
qer_map_size: 200000
```

Important : Changer les tailles des cartes nécessite un redémarrage d'OmniUPF et **efface toutes les sessions existantes**.

Problèmes de Performance

Problème : Débit faible (inférieur aux attentes)

Symptômes :

- Débit < 1 Gbps malgré un NIC capable
- Utilisation élevée du CPU

Diagnostic :

```
# Vérifiez le taux de paquets
curl http://localhost:8080/api/v1/packet_stats | jq '.total_rx,
.total_tx'

# Vérifiez les statistiques du NIC
ethtool -S eth0 | grep -i drop

# Vérifiez le mode XDP
ip link show eth0 | grep xdp
```

Résolutions :

Utilisation du mode XDP générique

Résolution :

```
# Passez au mode natif pour de meilleures performances
xdp_attach_mode: native  # Nécessite un NIC/pilote compatible XDP
```

Goulet d'étranglement à un seul cœur

Résolution :

```
# Activez RSS (Répartition de Charge de Réception) sur le NIC
ethtool -L eth0 combined 4  # Utilisez 4 files RX/TX

# Vérifiez que RSS est activé
ethtool -l eth0

# Fixez les interruptions à des CPU spécifiques
# Voir /proc/interrupts et utilisez irqbalance ou l'affinité
manuelle
```

Gonflement du tampon

Résolution :

```
# Réduisez les limites de tampon pour diminuer la latence
buffer_max_packets: 5000
buffer_packet_ttl: 15
```

Problème : Latence élevée

Symptômes :

- Latence de ping > 50 ms
- Dégradation de l'expérience utilisateur

Diagnostic :

```
# Testez la latence vers l'UE
ping -c 100 <UE_IP> | grep avg

# Vérifiez les paquets tamponnés
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_buffer_info | jq
'.total_packets_buffered'

# Vérifiez les performances du cache de routage
curl http://localhost:8080/api/v1/packet_stats | jq '.route_stats'
```

Résolutions :

Paquets étant excessivement tamponnés

Résolution :

```
# Vérifiez pourquoi les paquets sont tamponnés
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_buffer_info | jq '.buffers[]
| {far_id, packet_count, direction}'

# Effacez les tampons s'ils sont bloqués
# (redémarrez OmniUPF ou déclenchez une modification de session
PFCP pour appliquer le FAR)
```

Latence de recherche FIB

Résolution :

```
# Assurez-vous que le cache de routage est activé (option de
construction)
# Construisez avec BPF_ENABLE_ROUTE_CACHE=1

# Optimisez la table de routage
# Utilisez moins de routes, plus spécifiques au lieu de nombreuses
petites routes
```

Problème : Pertes de paquets sous charge

Symptômes :

- Le taux de perte augmente avec le trafic
- Erreurs RX sur le NIC

Diagnostic :

```
# Vérifiez les erreurs du NIC
ethtool -S eth0 | grep -E "drop|error|miss"

# Vérifiez la taille du tampon de la file
ethtool -g eth0

# Surveillez les pertes en temps réel
watch -n 1 'ethtool -S eth0 | grep -E "drop|miss"'
```

Résolution :

```
# Augmentez la taille du tampon RX
ethtool -G eth0 rx 4096

# Augmentez la taille du tampon TX
ethtool -G eth0 tx 4096

# Vérifiez les nouveaux paramètres
ethtool -g eth0
```

Problèmes Spécifiques au Hyperviseur

Pour des instructions de configuration spécifiques au hyperviseur, voir le Guide des Modes XDP.

Proxmox : XDP ne fonctionne pas dans la VM

Symptômes :

- Impossible d'attacher le programme XDP en mode natif
- Seul le mode générique fonctionne

Cause : VM utilisant un réseau en pont sans SR-IOV

Résolution :

Option 1 : Utilisez le mode générique (le plus simple)

```
xdp_attach_mode: generic
```

Option 2 : Configurez le passage SR-IOV

```
# Sur l'hôte Proxmox :
# 1. Activez IOMMU
nano /etc/default/grub
# Ajoutez : intel_iommu=on iommu=pt
update-grub
reboot

# 2. Créez des VFs
echo 4 > /sys/class/net/eth0/device/sriov_numvfs

# 3. Assignez le VF à la VM dans l'UI Proxmox
# Matériel → Ajouter → Dispositif PCI → Sélectionnez VF

# Dans la VM :
interface_name: [ens1f0]  # VF SR-IOV
xdp_attach_mode: native
```

VMware : Mode Promiscuous requis

Symptômes :

- Paquets non reçus par OmniUPF

Cause : vSwitch bloquant les adresses MAC non correspondantes

Résolution :

```
# Activez le mode promiscuous sur vSwitch (dans vSphere Client) :
# 1. Sélectionnez vSwitch → Modifier les paramètres
# 2. Sécurité → Mode Promiscuous : Accepter
# 3. Sécurité → Changements d'adresse MAC : Accepter
# 4. Sécurité → Transmissions forgées : Accepter
```

VirtualBox : Performance très faible

Symptômes :

- Débit < 100 Mbps

Cause : VirtualBox ne prend pas en charge SR-IOV ou XDP natif

Résolution :

```
# Utilisez le mode générique (seule option)
xdp_attach_mode: generic

# Optimisez les paramètres de VirtualBox :
# - Utilisez un adaptateur VirtIO-Net (si disponible)
# - Activez le mode promiscuous "Autoriser Tout"
# - Allouez plus de cœurs CPU à la VM
# - Utilisez un réseau en pont au lieu de NAT

# Envisagez de migrer vers KVM/Proxmox pour de meilleures
performances
```

Problèmes de NIC et de Pilote

Problème : Le pilote NIC ne prend pas en charge XDP

Symptômes :

```
ERRO[0000] échec de l'attachement du programme XDP : opération non
supportée
```

Diagnostic :

```
# Vérifiez le pilote NIC
ethtool -i eth0 | grep driver

# Vérifiez si le pilote prend en charge XDP
modinfo <driver_name> | grep -i xdp

# Listez les interfaces capables de XDP
ip link show | grep -B 1 "xdpgeneric\|xdpdrv\|xdpoffload"
```

Résolution :

Option 1 : Utilisez le mode générique

```
xdp_attach_mode: generic
```

Option 2 : Mettez à jour le pilote NIC

```
# Vérifiez les mises à jour du pilote (Ubuntu)
sudo apt update
sudo apt install linux-modules-extra-$(uname -r)

# Ou installez le pilote spécifique au fournisseur
# Exemple pour Intel :
# Téléchargez depuis https://downloadcenter.intel.com/
```

Option 3 : Remplacez le NIC

```
# Utilisez un NIC capable de XDP :
# - Intel X710, E810
# - Mellanox ConnectX-5, ConnectX-6
# - Broadcom BCM57xxx (pilote bnxt_en)
```

Problème : Plantages du pilote ou panique du noyau

Symptômes :

- Panique du noyau après l'attachement de XDP
- NIC ne répond plus

Diagnostic :

```
# Vérifiez les journaux du noyau
dmesg | tail -100

# Vérifiez les bugs du pilote
journalctl -k | grep -E "BUG:|panic:"
```

Résolution :

```
# 1. Mettez à jour le noyau et les pilotes
sudo apt update
sudo apt upgrade
sudo reboot

# 2. Désactivez le déchargement XDP (utilisez uniquement natif)
xdp_attach_mode: native

# 3. Utilisez le mode générique comme solution de contournement
xdp_attach_mode: generic

# 4. Signalez le bug au fournisseur NIC ou à l'équipe du noyau
Linux
```

Échecs d'Établissement de Session

Problème : Échec de l'établissement de session

Symptômes :

- Le SMF signale un échec de l'établissement de session
- L'UE ne peut pas établir de session PDU

Voir Référence des Codes de Cause PFCP pour des scénarios d'échec courants et des résolutions.

Diagnostic :

```
# Vérifiez les journaux d'OmniUPF pour les erreurs de session
journalctl -u omniupf | grep -i "établissement de session"

# Vérifiez le compte de session PFCP
curl http://localhost:8080/api/v1/sessions | jq 'length'

# Capturez le trafic PFCP pendant l'établissement de session
tcpdump -i any -n udp port 8805 -w /tmp/pfcp_session.pcap
```

Causes Courantes :

Capacité de la carte pleine

Résolution :

```
# Vérifiez l'utilisation de la carte
curl http://localhost:8080/api/v1/map_info | jq '.[] |
select(.usage_percent > 90)'

# Augmentez la capacité (voir la section carte eBPF pleine ci-
dessus)
```

Paramètres PDR/FAR invalides

Résolution :

```
# Vérifiez les journaux d'OmniUPF pour les erreurs de validation
journalctl -u omniupf | grep -E "invalide|erreur" | tail -20

# Problèmes courants :
# - Adresse IP UE invalide (0.0.0.0 ou dupliquée)
# - TEID invalide (0 ou dupliqué)
# - FAR manquant pour PDR
# - Action FAR invalide

# Vérifiez la configuration SMF et les paramètres de session
```

Fonctionnalité non supportée (UEIP/FTUP)

Résolution :

```
# Activez les fonctionnalités requises si nécessaire
feature_ueip: true  # Attribution d'IP UE par UPF
ueip_pool: 10.60.0.0/16

feature_ftup: true  # Attribution de F-TEID par UPF
teid_pool: 100000
```

Problèmes de Tamponnement

Problème : Paquets bloqués dans le tampon

Symptômes :

- Compte de paquets tamponnés en augmentation
- Paquets non livrés après un transfert

Diagnostic :

```
# Vérifiez les statistiques de tampon
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_buffer_info

# Vérifiez les tampons de FAR individuels
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_buffer_info | jq '.buffers[]
| {far_id, packet_count, oldest_packet_ms}'

# Surveillez la taille des tampons
watch -n 5 'curl -s http://localhost:8080/api/v1/upf_buffer_info |
jq ".total_packets_buffered"'
```

Causes et Résolutions :

FAR jamais mis à jour vers FORWARD

Cause : le SMF n'a jamais envoyé de modification de session PFCP pour appliquer le FAR

Résolution :

```
# Vérifiez l'état du FAR
curl http://localhost:8080/api/v1/sessions | jq '.[].fars[] |
{far_id, applied_action}'

# Action BUFF = 1 (tamponnage)
# Action FORW = 2 (transfert)

# Si bloqué dans l'état BUFF, demandez au SMF de :
# - Envoyer une demande de modification de session PFCP
# - Mettre à jour le FAR avec l'action FORW
```

TTL du tampon expiré

Cause : les paquets ont expiré avant la mise à jour du FAR

Résolution :

```
# Augmentez le TTL du tampon
buffer_packet_ttl: 60  # Augmentez de 30 à 60 secondes
```

Débordement de tampon

Cause : trop de paquets tamponnés par FAR

Résolution :

```
# Augmentez les limites de tampon
buffer_max_packets: 20000  # Par FAR
buffer_max_total: 200000   # Limite globale
```

Débogage Avancé

Activer la Journalisation de Débogage

```
logging_level: debug  # trace | debug | info | warn | error
```

```
# Redémarrez OmniUPF avec la journalisation de débogage
sudo systemctl restart omniupf

# Surveillez les journaux en temps réel
journalctl -u omniupf -f --output cat
```

Traçage du Programme eBPF

```
# Tracez l'exécution du programme eBPF (nécessite bpftrace)
sudo bpftrace -e 'tracepoint:xdp:* { @[probe] = count(); }'

# Tracez les opérations de carte
sudo bpftrace -e 'tracepoint:bpf:bpf_map_lookup_elem {
printf("%s\n", str(args->map_name)); }'
```

Capture de Paquets avec XDP

Comprendre les Limitations de Capture de Paquets XDP :

XDP traite les paquets **avant** la pile réseau du noyau, donc le `tcpdump` standard **ne peut pas voir le trafic traité par XDP**. Les paquets GTP-U (port UDP 2152) sur N3 sont traités par XDP et n'apparaîtront pas dans tcpdump sur l'hôte UPF.

Méthodes Recommandées pour l'Analyse du Trafic :

```
# Méthode 1 : Utilisez l'API de statistiques pour le suivi
(RECOMMANDÉE)
curl http://localhost:8080/api/v1/xdp_stats
curl http://localhost:8080/api/v1/packet_stats | jq
curl http://localhost:8080/api/v1/n3n6_stats

# Méthode 2 : Capturez le trafic PFCP (non affecté par XDP)
tcpdump -i any -n udp port 8805 -w /tmp/pfcp.pcap

# Méthode 3 : Capture de paquets hors bande (RECOMMANDÉE pour GTP-
U)
# Utilisez un TAP réseau ou un miroir de port de commutateur pour
capturer le trafic
# Exemples :
# - TAP physique entre gNB et UPF
# - Miroir/SPAN de commutateur copiant le trafic N3 vers
l'analyseur
# - Miroir de port de commutateur virtuel dans l'hyperviseur
#
# Sur l'hôte de capture (PAS le UPF) :
# tcpdump -i <mirror_interface> -n udp port 2152 -w
/tmp/n3_mirror.pcap
```

Exemples de Configuration de Capture Hors Bande :

Réseau Physique :

```
# Utilisez un TAP réseau ou configurez le miroir de port du
commutateur
# Exemple : configuration SPAN de commutateur Cisco
(config)# monitor session 1 source interface Gi1/0/1
(config)# monitor session 1 destination interface Gi1/0/24

# Sur l'hôte de surveillance connecté à Gi1/0/24 :
tcpdump -i eth0 -n udp port 2152 -w /tmp/n3_capture.pcap
```

Environnement Virtuel (VMware, KVM, etc.) :

```
# Configurez le miroir de port de commutateur virtuel pour envoyer
le trafic UPF à la VM d'analyse
# Exemple : pont Linux avec tcpdump sur une VM différente
# Sur l'hyperviseur, miroitez l'interface N3 de l'UPF vers
l'interface d'analyse

# Sur la VM d'analyse :
tcpdump -i eth1 -n udp port 2152 -w /tmp/n3_virtual.pcap
```

Pourquoi Hors Bande est Nécessaire :

- XDP contourne complètement la pile réseau du noyau
- Les paquets sont traités dans le pilote NIC ou le matériel
- Le tcpdump basé sur l'hôte voit les paquets APRÈS le traitement XDP (trop tard)
- La capture hors bande voit le trafic brut avant le traitement UPF

Ce que vous POUVEZ Capturer sur l'Hôte UPF :

- □ Trafic PFCP (UDP 8805) - plan de contrôle, non traité par XDP
- □ Réponses API et statistiques
- □ Trafic GTP-U (UDP 2152) - plan de données, traité par XDP

Obtenir de l'Aide

Si les étapes de dépannage ne résolvent pas votre problème :

1. **Collectez des informations de diagnostic** :

```
# Informations système
uname -a
cat /etc/os-release

# Informations OmniUPF
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_status
curl http://localhost:8080/api/v1/map_info
curl http://localhost:8080/api/v1/packet_stats

# Journaux
journalctl -u omniupf --since "1 hour ago" > /tmp/omniupf.log
dmesg > /tmp/dmesg.log

# Informations réseau
ip addr > /tmp/network.txt
ip route >> /tmp/network.txt
ethtool eth0 >> /tmp/network.txt
```

2. **Signalez le problème** avec :
    - Version d'OmniUPF
    - Version du noyau Linux
    - Diagramme topologique du réseau
    - Fichier de configuration (cacher les informations sensibles)
    - Extraits de journaux pertinents
    - Étapes pour reproduire

Documentation Connexe

- **Guide de Configuration** - Paramètres de configuration et exemples

- **Guide d'Architecture** - Internes eBPF/XDP et optimisation des performances
- **Guide de Surveillance** - Statistiques, capacité et alertes
- **Référence des Métriques** - Métriques Prometheus pour le dépannage
- **Codes de Cause PFCP** - Codes d'erreur PFCP et dépannage
- **Guide de Gestion des Règles** - Concepts PDR, FAR, QER, URR
- **Guide d'Opérations** - Architecture et aperçu de l'UPF

OmniUPF Jardin Clos / Redirection Hors Crédit

Table des Matières

Aperçu

La fonctionnalité Jardin Clos fournit une **application native de l'interdiction hors crédit** directement dans le UPF, éliminant ainsi le besoin de systèmes d'application externes (listes d'adresses MikroTik, règles de mangle, DNAT).

Lorsqu'un abonné n'a plus de crédit, le SMF envoie une Modification de Session PFCP avec un FAR contenant `redirect_information`. OmniUPF intercepte tout le trafic pour cette session dans l'espace utilisateur et impose une expérience de portail captif :

- **Les requêtes DNS** sont falsifiées pour renvoyer l'IP du serveur de portail, déclenchant la détection du portail captif sur tous les principaux appareils (Apple, Android, Windows)

- **Le trafic vers le portail et les IPs sur liste blanche** (processeurs de paiement, services CAPTCHA) est transféré normalement afin que l'abonné puisse recharger
- **Tout autre trafic** est silencieusement supprimé

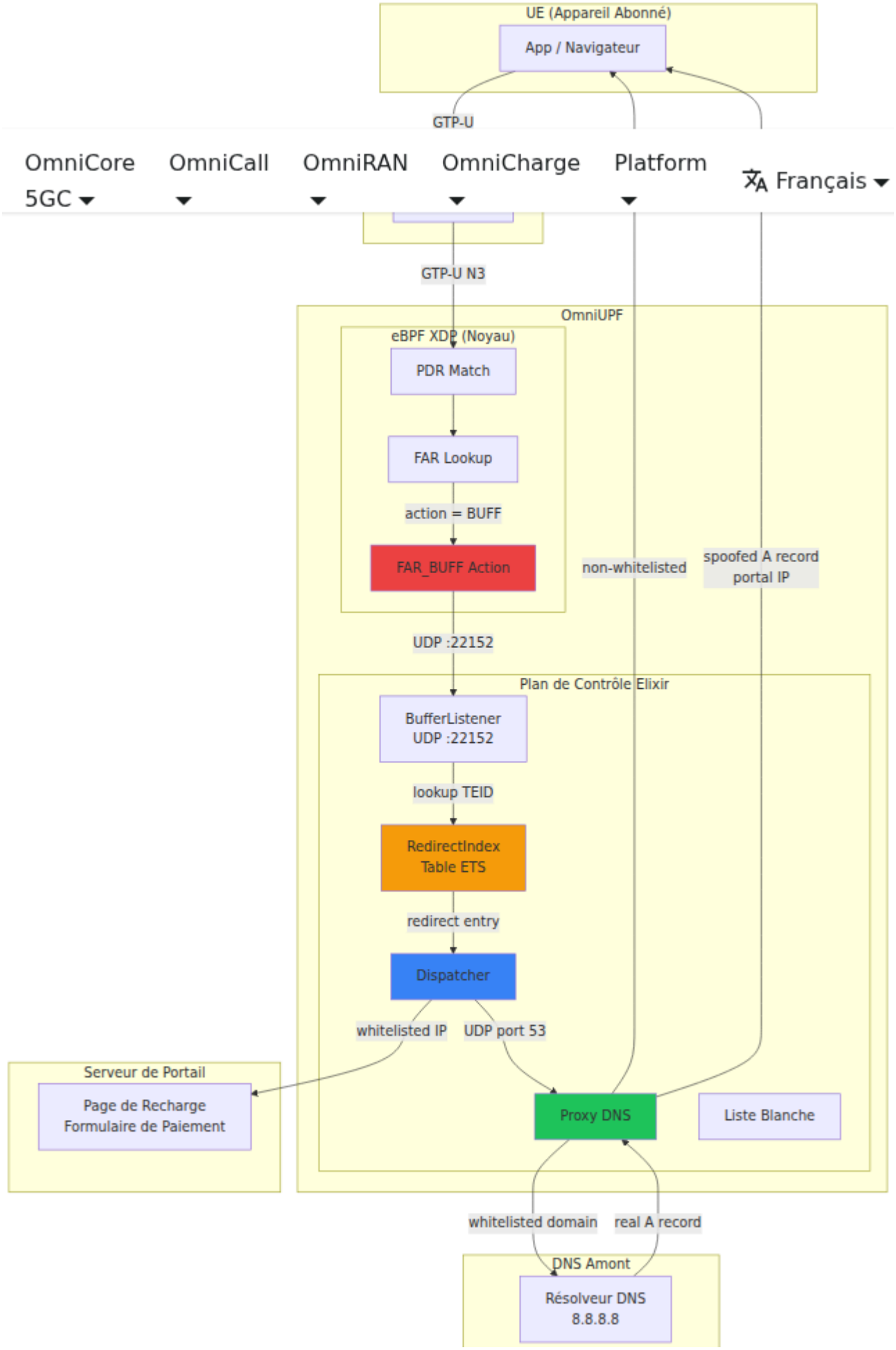
L'abonné voit une invite de portail captif et est dirigé vers une page de recharge/paiement. Une fois le crédit rétabli, le SMF met à jour le FAR en retour à FORW et le transfert normal reprend immédiatement.

Points Clés de Conception

- **Aucun changement eBPF requis** -- réutilise l'action `FAR_BUFF` existante pour rediriger les paquets vers l'espace utilisateur
- **Redirection par session** -- chaque session peut avoir une IP de portail et une URL de redirection différentes, déterminées par l'IE `redirect_information` du SMF
- **La liste blanche vit sur le UPF** -- le SMF dit seulement "redirige cette session" ; le UPF décide quel trafic laisser passer
- **Interception uniquement en amont** -- le FAR de liaison descendante reste FORW afin que les réponses du portail atteignent l'UE via le chemin d'encapsulation GTP normal

---

Architecture


UE (Appareil Abonné)
App / Navigateur
GTP-U
OmniCore 5GC
OmniCall
OmniRAN
OmniCharge
Platform
Français
GTP-U N3
OmniUPF
eBPF XDP (Noyau)
PDR Match
FAR Lookup
action = BUFF
FAR_BUFF Action
non-whitelisted
spoofed A record
portal IP
UDP :22152
Plan de Contrôle Elixir
BufferListener
UDP :22152
lookup TEID
RedirectIndex
Table ETS
redirect entry
Dispatcher
whitelisted IP
UDP port 53
Serveur de Portail
Page de Recharge
Formulaire de Paiement
Proxy DNS
Liste Blanche
whitelisted domain
real A record
DNS Amont
Résolveur DNS
8.8.8.8

Flux de Paquet

1. **L'UE envoie un paquet en amont** (requête DNS, requête HTTP, etc.) via GTP-U au UPF
2. **La correspondance PDR eBPF** trouve le PDR correspondant, recherche le FAR
3. **L'action FAR est BUFF** (remplacée de FORW lorsque la redirection est active) -- eBPF envoie le paquet au BufferListener sur le port UDP 22152
4. **BufferListener** extrait le TEID, vérifie la table ETS RedirectIndex
5. Si le TEID est dans le RedirectIndex : **Dispatcher** traite le paquet IP interne
6. **Arbre de décision** :
   - Requête DNS pour un domaine non sur liste blanche : falsifier l'enregistrement A avec l'IP du portail
   - Requête DNS pour un domaine sur liste blanche : transférer au résolveur réel, mettre en cache les IP résolues
   - Trafic vers l'IP du portail ou l'IP sur liste blanche : transférer via socket brut
   - Tout le reste : supprimer silencieusement
7. **Les réponses DNS/GTP-U** sont renvoyées à l'UE via le chemin GTP-U descendant (encapsulées avec le TEID DL et envoyées au gNB)

Gestion de Boucle N9 (Session SGW + PGW Double)

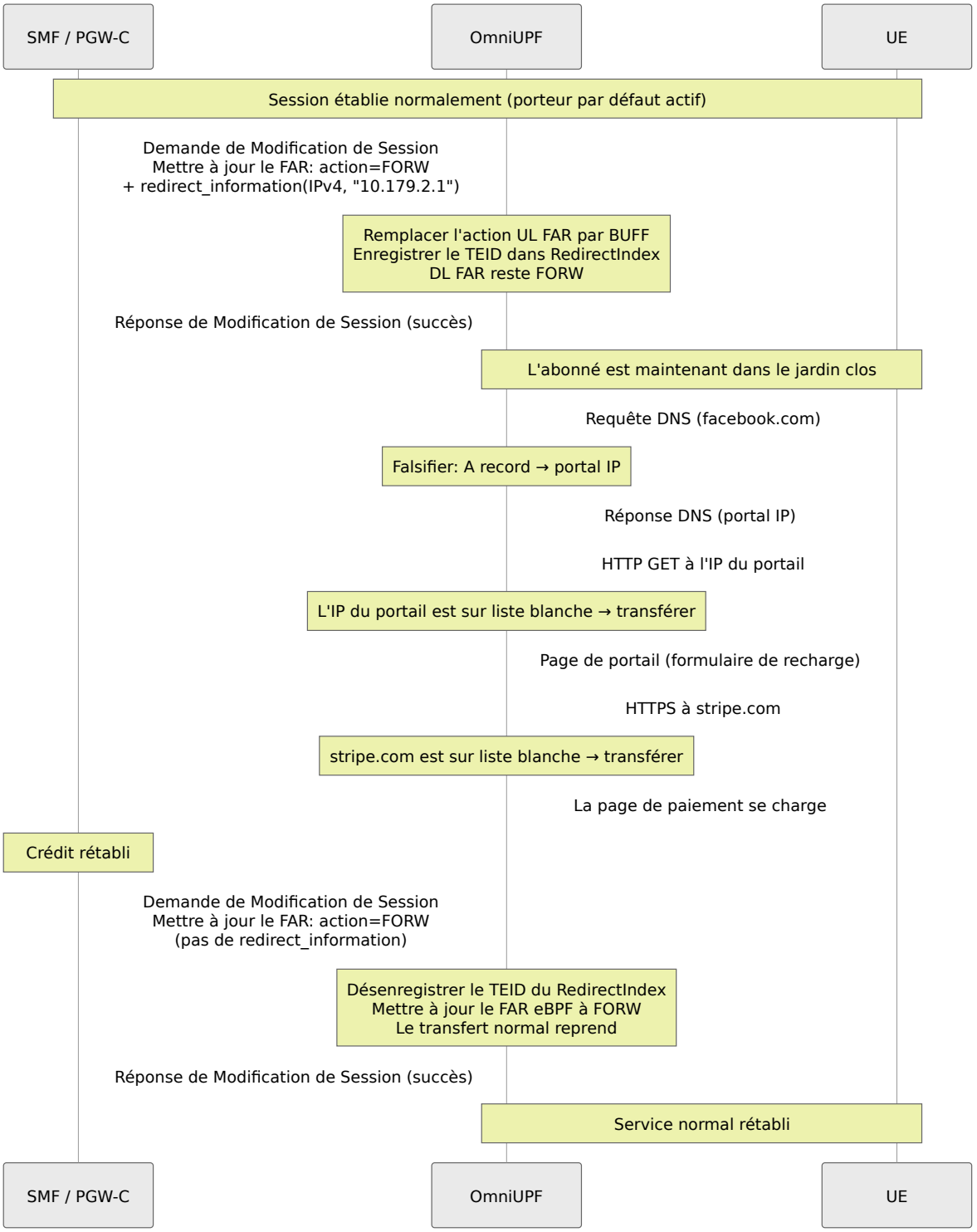
Dans les déploiements EPC 4G, OmniUPF agit souvent comme **SGW-U et PGW-U simultanément** sur le même nœud. Le SGW-C et le PGW-C établissent chacun une session PFCP distincte. La session SGW a un FAR N9 qui transfère les paquets vers le TEID uplink de la session PGW (une boucle à travers l'interface N3). La session PGW effectue l'application réelle de la politique de l'abonné.

Lors de l'activation d'une redirection de jardin clos via `POST /v1/walled_garden`, la logique d'activation détecte automatiquement cette topologie :

1. **TEID(s) de session PGW** sont identifiés à partir des PDRs uplink du SEID cible.
2. Le code scanne toutes les sessions PFCP pour trouver une session (la session SGW) qui a un FAR dont le `teid` correspond à l'un des TEIDs PDR UL PGW et a `outer_header_creation` défini. Ce FAR est le FAR de transfert N9 pointant vers le PGW.
3. **Les deux** FARs UL PGW et les FARs UL faisant face au gNB du SGW sont remplacés par `BUFF` dans la carte eBPF. Cela est nécessaire car le programme eBPF voit le paquet lorsqu'il arrive de l'eNB avec le TEID du SGW, pas le TEID du PGW.
4. Seuls les **PDRs UL faisant face au gNB du SGW** sont enregistrés dans le RedirectIndex (pas les PDRs UL PGW). Le TEID PDR UL SGW est ce que l'eBPF verra dans le paquet entrant de l'eNB.
5. Pour le **chemin DL** (renvoyant les réponses à l'UE), le Dispatcher utilise le **FAR DL de la session SGW** (le FAR transférant vers l'eNB, avec `remoteip != n3_address`). Ce FAR contient le TEID eNB actuel et l'IP gNB. Le TEID DL est recherché en direct à partir de l'état de la session au moment de la réponse, pas mis en cache au moment de l'activation — cela gère le cas où le TEID eNB est attribué par une modification de session ultérieure après l'activation de la redirection.

Dans une topologie UPF directe (pas de SGW, le SMF parle directement au UPF), seules les propres FARs et TEIDs UL de la session sont impliqués — le code de détection SGW ne trouve rien et les PDRs UL de la session principale sont enregistrés directement.

Flux de Signalisation PFCP



IEs PFCP Impliqués

Le SMF déclenche une redirection en incluant `redirect_information` dans les `forwarding_parameters` du FAR :

IE	Description
`apply_action`	Défini sur FORW par le SMF (UPF remplace par BUFF en interne)
`redirect_information`	Contient le type et l'adresse de redirection
`forwarding_parameters`	Contient le `redirect_information` et `outer_header_creation`

Types d'Information de Redirection (selon 3GPP TS 29.244 Table 8.2.20-1) :

Type	Valeur	Comportement UPF
IPv4	0	Utiliser la chaîne d'adresse IPv4 fournie comme IP du portail
IPv6	1	Utiliser la chaîne d'adresse IPv6 fournie comme IP du portail
URL	2	Résoudre le nom d'hôte de l'URL en une IP ; utiliser cela comme IP du portail. Le chemin de l'URL n'est pas utilisé par le UPF -- il est stocké dans l'API pour visibilité uniquement. Le serveur web du portail est responsable de la gestion de tout routage basé sur le chemin.
SIP URI	3	Pas actuellement supporté

Détection de Portail Captif

Le jardin clos déclenche une **détection automatique de portail captif** sur toutes les principales plateformes d'appareils en falsifiant les réponses DNS. Lorsqu'un appareil se connecte et tente de vérifier la connectivité Internet, il

interroge des domaines bien connus. La réponse DNS falsifiée redirige ces vérifications vers l'IP du portail, que l'appareil interprète comme un portail captif.

Domaines de Détection de Plateforme

Plateforme	Domaine de Détection	Réponse
Apple (iOS/macOS)	`captive.apple.com`	HTTP 200 avec `<HTML><HEAD>&lt` `</HEAD><BODY>Succes`
Android	`connectivitycheck.gstatic.com`	HTTP 204
Windows	`www.msftconnecttest.com`	HTTP 200 avec `Microsof`
Samsung	`connectivitycheck.samsung.com`	HTTP 200

Lorsque ces domaines se résolvent vers l'IP du portail au lieu de leurs vraies adresses, l'appareil détecte un portail captif et présente la page du portail à l'utilisateur soit sous forme de :

- Une notification/pop-up (iOS, Android)
- Une redirection automatique du navigateur (Windows)

Le serveur de portail à l'IP du portail configurée doit fournir des réponses appropriées pour ces URLs de détection et ensuite rediriger vers la page de recharge/paiement.

Configuration

La configuration du jardin clos se trouve dans le fichier de configuration d'exécution. Sur une installation de production (`.deb` package), le fichier de configuration est à `/etc/omniupf/runtime.exs`. Le script de démarrage de la version (`rel/env.sh`) vérifie ce fichier et, s'il est présent, définit

`RELEASE_CONFIG_DIR=/etc/omniupf` afin que la version Erlang l'utilise au lieu du `config/runtime.exs` intégré. Le UPF doit être redémarré après les modifications de configuration.

```
#
=========================================================================
# Jardin Clos / Redirection Hors Crédit
#
=========================================================================

# Activer l'application de redirection du jardin clos
walled_garden_enabled = true

# IP du serveur de portail (portail captif / page de recharge)
walled_garden_portal_ip = "10.179.2.1"

# Résolveur DNS amont pour les recherches de domaine sur liste blanch
walled_garden_dns_resolver = "8.8.8.8"

# Domaines sur liste blanche (les abonnés peuvent accéder à ceux-ci p
la redirection)
# Prend en charge les jokers : "*.stripe.com" correspond à "api.strip
walled_garden_whitelist = [
  "stripe.com",
  "*.stripe.com",
  "js.stripe.com",
  "hcaptcha.com",
  "*.hcaptcha.com",
  "newassets.hcaptcha.com",
]
```

Paramètres

Paramètre	Type	Requis	Par Défaut	De
`walled_garden_enabled`	Booléen	Non	`false`	Interrup pour la f du jardi `false`, `redirec` dans les ignoré.
`walled_garden_portal_ip`	Chaîne (IPv4)	Oui (si activé)	`10.179.2.1`	Adresse captif / s recharge portail d utilisée d'hôte d `redirec` du SMF être rés le type d est SIP U types IP l'adresse utilisée Pour le t nom d'h au mom création
`walled_garden_dns_resolver`	Chaîne (IPv4)	Non	`8.8.8.8`	Résolveu utilisé lo des requ domaine blanche requête

Paramètre	Type	Requis	Par Défaut	De
				sur liste envoyée résolveu autres r falsifiées
`walled_garden_whitelist`	Liste de Chaînes	Non	`[]`	Modèles auxquel peuvent pendant Voir Ges Blanche syntaxe

---

Gestion de la Liste Blanche

La liste blanche contrôle quels domaines (et leurs IP résolues) les abonnés peuvent atteindre pendant la redirection. Cela est configuré sur le UPF, pas sur le SMF -- le SMF ne déclenche que la redirection.

Syntaxe des Modèles

Modèle	Correspond à	Ne Correspond Pas
`stripe.com`	`stripe.com`, `api.stripe.com`, `js.stripe.com`	`evilstripe.com`, `notstripe.com`
`*.stripe.com`	`api.stripe.com`, `js.stripe.com`, `dashboard.stripe.com`	`stripe.com` (exact), `evilstripe.com`
`hcaptcha.com`	`hcaptcha.com`, `newassets.hcaptcha.com`	`evihcaptcha.com`

Les modèles utilisent **l'ancrage de sous-domaine** : `stripe.com` correspond au domaine lui-même et à tout sous-domaine (`foo.stripe.com`), mais pas aux domaines qui contiennent simplement la chaîne (`evilstripe.com`). La correspondance est insensible à la casse.

Mise en Cache des IP

Lorsque le proxy DNS transfère une requête pour un domaine sur liste blanche, les adresses IP résolues sont **automatiquement mises en cache** dans la liste blanche. Cela signifie :

1. L'abonné interroge `api.stripe.com`
2. Le proxy DNS transfère au résolveur réel, obtient `104.18.7.25`
3. `104.18.7.25` est ajouté au cache IP sur liste blanche
4. Le trafic HTTP/HTTPS ultérieur vers `104.18.7.25` est transféré (non supprimé)

L'IP du portail est toujours sur liste blanche, quelle que soit la configuration.

Domaines Recommandés pour la Liste Blanche

Pour un portail de recharge typique avec traitement de paiement Stripe et hCaptcha :

```
walled_garden_whitelist = [
  # Processeur de paiement
  "stripe.com",
  "*.stripe.com",

  # Service CAPTCHA
  "hcaptcha.com",
  "*.hcaptcha.com",

  # Google Fonts (si le portail les utilise)
  "fonts.googleapis.com",
  "fonts.gstatic.com",

  # CDN pour les actifs du portail (si hébergé à l'extérieur)
  "cdn.example.com",
]
```

URLs de Redirection par Session

Chaque session PFCP peut avoir une **cible de redirection différente**. Le SMF contrôle cela via l'IE `redirect_information` dans le FAR :

- **Type IPv4** : La chaîne IP fournie est analysée et utilisée comme IP du portail pour cette session
- **Type IPv6** : La chaîne IPv6 fournie est analysée et utilisée comme IP du portail pour cette session
- **Type URL** : Le nom d'hôte est extrait et résolu via DNS au moment de la création du FAR. L'IP résolue est utilisée comme IP du portail. Le chemin de l'URL n'est pas utilisé par le UPF -- il est stocké pour visibilité API uniquement.

Cela permet des scénarios où différents niveaux d'abonnés, MVNOs ou plans de service redirigent vers différents portails :

Session	SMF redirect_information	IP du Portail Utilisée	U
Session A	`IPv4: 10.179.2.1`	`10.179.2.1`	`10.179.`
Session B	`IPv6: 2001:db8::1`	`2001:db8::1`	`2001:db`
Session C	`URL: https://topup.mvno.com/recharge`	IP résolue de `topup.mvno.com`	`https:/`

Le UPF stocke l'IP du portail par session et l'URL de redirection, qui sont visibles via l'API.

API

Le chemin de base pour tous les points de terminaison du jardin clos est `/v1/walled_garden` (pas de préfixe `/api`). Ces points de terminaison sont servis par le serveur HTTP Phoenix sur le `api_port` configuré (par défaut : 8080).

GET /v1/walled_garden

Renvoie toutes les sessions de redirection de jardin clos actives, les IP sur liste blanche, les plages CIDR mises en cache et les détails de session.

Réponse :

```
{
  "redirect_count": 2,
  "redirects": [
    {
      "teid": "0x4000",
      "session_seid": 1,
      "portal_ip": "10.179.2.1",
      "redirect_url": null,
      "ue_ip": "10.60.0.1",
      "gnb_ip": "10.179.1.21",
      "dl_teid": "0x5000",
      "far_global_id": 42
    },
    {
      "teid": "0x4001",
      "session_seid": 2,
      "portal_ip": "10.179.2.2",
      "redirect_url": "https://topup.mvno.com",
      "ue_ip": "10.60.0.2",
      "gnb_ip": "10.179.1.21",
      "dl_teid": "0x5001",
      "far_global_id": 43
    }
  ],
  "whitelisted_ips": [
    {"ip": "10.179.2.1", "type": "portal"},
    {"ip": "104.18.7.25", "type": "resolved"},
    {"ip": "104.18.6.25", "type": "resolved"}
  ],
  "whitelisted_cidrs": ["192.168.0.0/24"]
}
```


Champs de Réponse :

Champ	Description
`redirect_count`	Nombre de sessions de jardin clos actives
`redirects[].teid`	TEID uplink intercepté (hex)
`redirects[].session_seid`	SEID de session PFCP
`redirects[].portal_ip`	IP du portail pour cette session spécifique
`redirects[].redirect_url`	URL de redirection du SMF (si type URL), ou null
`redirects[].ue_ip`	Adresse IP de l'UE
`redirects[].gnb_ip`	IP gNB pour les réponses GTP-U
`redirects[].dl_teid`	TEID de liaison descendante pour l'encapsulation GTP-U
`redirects[].far_global_id`	ID global FAR interne
`whitelisted_ips`	Toutes les IP actuellement dans la liste blanche (portail + résolutions DNS mises en cache)
`whitelisted_cidrs`	Plages CIDR ajoutées via l'API de liste blanche

POST /v1/walled_garden

Active la redirection de jardin clos sur une session PFCP existante par SEID. C'est le chemin déclenché par l'opérateur/API — le chemin normal est via la Modification de Session PFCP avec `redirect_information` dans un FAR. Le chemin API est utile pour les tests et pour les opérateurs qui ont besoin de rediriger manuellement une session sans l'implication du SMF.

Corps de la requête :

```
{
  "seid": 1,
  "url": "http://10.179.2.1/"
}
```

Champ	Type	Requis	Description
`seid`	Entier	Oui	SEID local de la session PFCP à rediriger
`url`	Chaîne	Oui	Cible de redirection — une adresse IPv4/IPv6 ou une URL. Si une URL est donnée, le nom d'hôte est résolu et l'IP résultante est utilisée comme IP du portail. La chaîne d'URL complète est stockée pour visibilité API.

Réponse (200 OK) :

```
{
  "status": "redirect activated",
  "info": {
    "seid": 1,
    "sgw_seid": 7,
    "portal_ip": "10.179.2.1",
    "ue_ip": "10.60.0.1",
    "gnb_ip": "10.179.1.21",
    "ul_teids": ["0x4000", "0x4006"]
  }
}
```

Le champ `sgw_seid` est non nul lorsqu'une boucle N9 (session jumelée SGW+PGW) a été détectée et que son TEID uplink a également été BUFFé. `ul_teids` liste tous les TEIDs uplink qui ont été enregistrés dans l'index de redirection.

Réponses d'erreur :

Statut	Signification
404	Session non trouvée (SEID ne correspond à aucune session PFCP active)
400	Paramètres requis manquants

DELETE /v1/walled_garden/:seid

Désactive la redirection de jardin clos pour une session, restaurant le transfert normal. Tous les FARs uplink pour la session (y compris les FARs de session SGW jumelés dans une topologie de boucle N9) sont rétablis à `action=FORW` dans la carte eBPF, et les TEIDs sont désenregistrés de l'index de redirection.

Paramètre de chemin : `:seid` — le SEID local de la session à désactiver.

Réponse (200 OK) :

```
{"status": "redirect removed", "info": {"seid": 1}}
```

Réponses d'erreur :

Statut	Signification
404	Session non trouvée

GET /v1/walled_garden/whitelist

Renvoie la liste blanche actuelle : IPs mises en cache individuelles (IP du portail et IPs résolues DNS) et toute plage CIDR ajoutée via l'API.

Réponse :

```
{
  "ips": [
    {"ip": "10.179.2.1", "type": "portal"},
    {"ip": "104.18.7.25", "type": "resolved"}
  ],
  "cidrs": ["192.168.100.0/24"]
}
```

POST /v1/walled_garden/whitelist

Ajoute une adresse IP ou une plage CIDR à la liste blanche à l'exécution, sans redémarrer le UPF. Les modifications sont uniquement en mémoire et ne persistent pas entre les redémarrages — ajoutez des entrées permanentes à `walled_garden_whitelist` dans `runtime.exs`.

Corps de la requête (ajouter une IP) :

```
{"ip": "203.0.113.10"}
```

Corps de la requête (ajouter une plage CIDR) :

```
{"cidr": "192.168.100.0/24"}
```

Exactement un des `ip` ou `cidr` doit être présent. Ajouter une plage CIDR signifie que tout le trafic vers les IPs dans cette plage est transféré par le dispatcher sans avoir besoin d'une entrée de cache DNS par IP.

Réponse (200 OK — IP ajoutée) :

```
{"status": "added", "ip": "203.0.113.10"}
```

Réponse (200 OK — CIDR ajoutée) :

```
{"status": "added", "cidr": "192.168.100.0/24"}
```

Réponses d'erreur :

Statut	Signification
400	IP invalide, CIDR invalide ou champs de corps manquants

Métriques Prometheus

Jauges

Métrique: `upf_walled_garden_active_redirects` **Type**: Jauge **Description**: Nombre de sessions actuellement dans l'état de redirection de jardin clos

Exemples de requêtes:

```
# Nombre actuel de redirections
upf_walled_garden_active_redirects
```

Compteurs

Métrique: `upf_walled_garden_packets_intercepted_total` **Type**: Compteur **Description**: Total des paquets interceptés par le jardin clos (tout le trafic uplink des sessions redirigées)

Métrique: `upf_walled_garden_packets_dropped_total` **Type**: Compteur **Description**: Total des paquets supprimés par le jardin clos (trafic non sur liste blanche, non-DNS)

Métrique: `upf_walled_garden_packets_forwarded_total` **Type**: Compteur **Labels**:

- `dst_ip` - IP de destination du paquet transféré **Description**: Paquets transférés à travers le jardin clos vers des destinations sur liste blanche. Étiqueté par IP de destination pour une visibilité par destination.

Métrique: `upf_walled_garden_bytes_forwarded_total` **Type**: Compteur **Labels**:

- `dst_ip` - IP de destination du trafic transféré **Description**: Octets transférés à travers le jardin clos par IP de destination. Utilisez ceci pour identifier quels services sur liste blanche les abonnés accèdent pendant la redirection.

Métrique: `upf_walled_garden_dns_spoofed_total` **Type**: Compteur **Labels**:

- `domain` - Le domaine qui a été falsifié **Description**: Requêtes DNS falsifiées par le jardin clos. Étiqueté par domaine interrogé.

Métrique: `upf_walled_garden_dns_forwarded_total` **Type**: Compteur **Labels**:

- `domain` - Le domaine sur liste blanche qui a été transféré **Description**: Requêtes DNS transférées au résolveur réel (domaines sur liste blanche). Étiqueté par domaine.

Exemples de Requêtes

```
# Sessions de jardin clos actives
upf_walled_garden_active_redirects

# Taux d'interception (paquets/sec)
rate(upf_walled_garden_packets_intercepted_total[5m])

# Taux de suppression (devrait être la majorité des interceptés)
rate(upf_walled_garden_packets_dropped_total[5m])

# Trafic transféré par destination (octets/sec)
sum by (dst_ip)
(rate(upf_walled_garden_bytes_forwarded_total[5m]))

# Top 5 des destinations sur liste blanche par volume de trafic
topk(5, sum by (dst_ip)
(rate(upf_walled_garden_bytes_forwarded_total[5m])))

# Domaines falsifiés les plus interrogés
topk(10, sum by (domain)
(rate(upf_walled_garden_dns_spoofed_total[5m])))

# Taux de recherche de domaine sur liste blanche
sum by (domain) (rate(upf_walled_garden_dns_forwarded_total[5m]))

# Ratio de paquets supprimés par rapport à ceux transférés
sum(rate(upf_walled_garden_packets_dropped_total[5m]))
  / sum(rate(upf_walled_garden_packets_intercepted_total[5m]))
```

Dépannage

Portail Captif Non Apparaissant sur l'Appareil

Symptômes: L'abonné est redirigé (visible dans l'API) mais l'appareil ne montre pas l'invite du portail captif.

Causes possibles:

- Serveur de portail ne répondant pas à l'IP du portail configurée
- Serveur de portail ne gérant pas les URLs de détection spécifiques à la plateforme
- Réponse DNS n'atteignant pas l'UE (vérifiez le chemin GTP-U)

Résolution:

1. Vérifiez que le serveur de portail est accessible : `curl http://<portal_ip>/`
2. Confirmez que le portail gère les URLs de détection (par exemple, `GET /hotspot-detect.html` pour Apple)
3. Vérifiez `GET /v1/walled_garden` pour confirmer que la session est enregistrée
4. Vérifiez les métriques Prometheus : `upf_walled_garden_dns_spoofed_total` devrait s'incrémenter
5. Vérifiez que le chemin GTP-U descendant fonctionne (DL FAR doit rester FORW)

Page de Paiement Ne Charge Pas

Symptômes: L'abonné voit le portail captif mais ne peut pas atteindre la page de paiement (Stripe, etc.).

Causes possibles:

- Domaine du processeur de paiement non dans la liste blanche
- Processeur de paiement utilisant une IP CDN qui n'a pas été mise en cache
- Modèle de liste blanche ne correspondant pas correctement aux sous-domaines

Résolution:

1. Vérifiez `GET /v1/walled_garden` — vérifiez que `whitelisted_ips` inclut les IPs du processeur de paiement
2. Vérifiez Prometheus : `upf_walled_garden_dns_forwarded_total{domain="stripe.com"}` devrait montrer des recherches

3. Ajoutez les domaines manquants à la liste blanche (commun : `js.stripe.com`, `m.stripe.network`)
4. Vérifiez `upf_walled_garden_bytes_forwarded_total` par `dst_ip` pour voir quel trafic circule réellement

Redirection Ne S'Active Pas

Symptômes: Le SMF envoie une Modification de Session avec `redirect_information` mais le trafic de l'abonné n'est pas intercepté.

Causes possibles:

- `walled_garden_enabled` est `false`
- L'IE `redirect_information` est dans le mauvais FAR (doit être dans le **FAR uplink**)
- Action FAR non remplacée par BUFF

Résolution:

1. Vérifiez la configuration : `walled_garden_enabled = true`
2. Vérifiez `GET /v1/pfcp_sessions` — regardez l'action FAR pour la session. Le FAR uplink doit montrer l'action `0x04` (BUFF)
3. Vérifiez `GET /v1/walled_garden` — le TEID de la session doit apparaître dans la liste de redirection
4. Vérifiez les journaux UPF pour les messages `redirect_info` pendant la modification de session

Redirection Ne Se Supprime Pas Après Recharge

Symptômes: L'abonné a rechargé mais le trafic est toujours intercepté.

Causes possibles:

- Le SMF n'a pas envoyé la Modification de Session pour supprimer la redirection
- Transition BUFF->FORW non détectée

Résolution:

1. Vérifiez `GET /v1/walled_garden` — la session est-elle toujours répertoriée ?
2. Vérifiez `GET /v1/pfcp_sessions` — vérifiez que l'action FAR a été mise à jour en retour à `0x02` (FORW)
3. Vérifiez les journaux SMF pour confirmer qu'il a envoyé la Modification de Session
4. Vérifiez les journaux UPF pour le message "redirect removed, unregistering walled garden"

Mauvais TEID Descendant (Obsolète Après Modification de Session)

Symptômes: Les réponses falsifiées DNS ou le trafic transféré n'atteignent pas l'UE ; les paquets GTP-U sont envoyés à la bonne IP gNB mais l'eNB les rejette comme TEID inconnu.

Cause: Dans les topologies 4G/SGW+PGW, le TEID eNB dans le FAR DL du SGW peut être zéro ou un TEID de remplacement au moment où la redirection du jardin clos est activée (par exemple, l'échange `Initial Context Setup` se produit après l'établissement de session). Lorsque l'eNB attribue son TEID et le renvoie via Modification de Session, le FAR DL dans la session SGW est mis à jour — mais si le Dispatcher avait mis en cache l'ancienne valeur, il utiliserait le mauvais TEID.

Résolution: Le Dispatcher résout le TEID DL **en direct** au moment de la réponse en recherchant le FAR DL actuel de la session SGW (le FAR avec `outer_header_creation` défini et `remoteip != n3_address`). Il ne tombe en arrière sur la valeur stockée au moment de l'activation que si la recherche de session échoue. Par conséquent, un TEID obsolète devrait se corriger de lui-même dès que la prochaine réponse DNS ou transférée est envoyée. Si vous voyez toujours le mauvais TEID :

1. Vérifiez `GET /v1/walled_garden` — vérifiez que `dl_teid` dans l'entrée de redirection semble plausible (non zéro).
2. Vérifiez `GET /v1/pfcp_sessions` — regardez les entrées FAR de la session SGW ; le FAR faisant face au gNB doit avoir le `teid` et `remoteip` actuels.

3. Si la session SGW a été supprimée (par exemple, transfert ou libération), l'entrée de redirection restera dans le RedirectIndex mais la recherche en direct échouera. Dans ce cas, utilisez `DELETE /v1/walled_garden/:seid` pour nettoyer l'entrée obsolète et laisser le SMF rétablir.

Le Portail Renvoie 304 Non Modifié

Symptômes: Le navigateur de l'abonné affiche une page blanche ou la page du portail captif se charge une fois mais les visites suivantes apparaissent vides.

Cause: Les réponses HTTP 304 (Non Modifié) sont envoyées lorsque le navigateur a une version mise en cache de la page et que le serveur confirme que rien n'a changé. Pour les flux de portail captif, certains serveurs web de portail envoient 304 en réponse aux requêtes de détection de plateforme (`/hotspot-detect.html`, `/generate_204`, etc.) si le navigateur envoie des en-têtes `If-Modified-Since` ou `If-None-Match`. Certaines implémentations de portail captif envoient également 304 pour la page de redirection elle-même.

Résolution:

1. Le UPF transfère les réponses HTTP du serveur de portail de manière transparente — il ne modifie pas les codes de réponse. Le problème se situe dans la configuration du serveur de portail.
2. Sur le serveur de portail, assurez-vous que les points de terminaison de détection de plateforme renvoient le code de statut correct (200, pas 304) avec le contenu de corps attendu (voir Détection de Portail Captif).
3. Configurez le serveur de portail pour envoyer `Cache-Control: no-store` et omettre les en-têtes `ETag`/`Last-Modified` sur les points de terminaison de détection afin que les navigateurs ne les mettent pas en cache.
4. Vérifiez avec : `curl -v -H "If-None-Match: foo" http://<portal_ip>/hotspot-detect.html` — la réponse devrait être 200, pas 304.

Transfert de Socket Brut

Lorsque le Dispatcher transfère un paquet vers une IP sur liste blanche, il utilise un **socket brut** (`IPPROTO_RAW`, numéro de protocole 255) via le module `:socket` d'Erlang. Un nouveau socket brut est ouvert par paquet, le paquet IP interne complet (tel que reçu de l'eBPF) est envoyé avec `sendto`, et le socket est immédiatement fermé.

Comment cela fonctionne: Le paquet IP interne du payload GTP-U a déjà un en-tête IP valide avec l'IP de l'UE comme source et l'IP du serveur de destination comme destination. En injectant ce paquet via un socket brut en utilisant `IPPROTO_RAW`, le noyau le route en fonction de l'IP de destination en utilisant la table de routage de l'hôte. L'interface N6 du UPF doit avoir une route vers le serveur de portail/sur liste blanche pour que cela fonctionne.

Problèmes courants :

Symptôme	Cause Probable	Solution
Transfert échoue silencieusement	`EPERM` — le socket brut nécessite root ou `CAP_NET_RAW`	Assurez-vous qu'OmniUPF s'exécute en tant que root ou a la capacité `CAP_NET_RAW`
Paquets transférés mais aucune réponse n'atteint l'UE	Route N6 vers le portail manquante	Ajoutez une route vers le sous-réseau du portail sur l'hôte UPF
`Walled garden: raw socket open failed` dans les journaux	Capacité manquante ou restriction du noyau	Vérifiez le service `systemd` `AmbientCapabilities=CAP_NET_RAW`
Transfert fonctionne mais l'UE obtient une mauvaise IP comme source	NAT sur N6 réécrit la source	Assurez-vous que les réponses du portail à l'IP de l'UE sont routées à nouveau via UPF

Vérifiez les journaux UPF pour les messages `Walled garden forward failed` et `raw socket open failed`. Utilisez les métriques Prometheus `upf_walled_garden_packets_forwarded_total` et `upf_walled_garden_bytes_forwarded_total` pour confirmer que le trafic circule.

Avertissement de Haute Cardinalité pour Prometheus

Remarque: Les labels `dst_ip` et `domain` sur les métriques de jardin clos peuvent produire une haute cardinalité si de nombreuses destinations ou

domaines uniques sont interrogés. Dans les grands déploiements, envisagez d'utiliser des règles d'enregistrement pour agréger ces métriques :

```
# Règle d'enregistrement pour agréger par sous-réseau /24 au lieu
d'IP individuelle
sum by (dst_subnet) (
  label_replace(
    rate(upf_walled_garden_bytes_forwarded_total[5m]),
    "dst_subnet", "$1.0/24", "dst_ip", "(\d+\.\d+\.\d+)\.\d+"
  )
)
```

Guide des opérations de l'interface Web

Table des matières

Aperçu

L'interface Web OmniUPF fournit un panneau de contrôle complet pour la surveillance et la gestion en temps réel de la fonction de plan utilisateur. L'interface est construite sur Phoenix LiveView et offre :

- **Visibilité en temps réel** sur les sessions PFCP et les connexions PDU actives
- **Inspection des règles** pour PDR, FAR, QER et URR à travers toutes les sessions
- **Gestion des tampons** pour le stockage de paquets lors d'événements de mobilité
- **Surveillance des statistiques** pour le traitement des paquets, les routes et les interfaces

- **Suivi de la capacité** pour l'utilisation et les limites des cartes eBPF
- **Visualisation des journaux en direct** pour le dépannage

Architecture

Le panneau de contrôle communique avec plusieurs instances OmniUPF via leur API REST pour :

- Interroger les sessions et associations PFCP
- Inspecter les règles de détection et de transfert de paquets
- Surveiller les tampons de paquets et leur statut
- Accéder aux statistiques en temps réel et aux métriques de performance
- Suivre la capacité et l'utilisation des cartes eBPF

Accès au panneau de contrôle

Accès par défaut

Le panneau de contrôle est accessible via HTTPS sur le serveur de gestion OmniUPF :

```
https://<upf-server>:443/
```

Port par défaut : 443 (HTTPS avec certificat auto-signé)

Configuration

Le panneau de contrôle nécessite la configuration de l'hôte OmniUPF dans `config/config.exs` :

Plusieurs instances UPF peuvent être configurées pour des déploiements multi-instances :

La configuration `upf_hosts` définit quelles instances OmniUPF sont disponibles dans le menu déroulant du sélecteur d'hôte à travers l'interface.

Navigation

Le panneau de contrôle fournit des onglets de navigation pour chaque domaine opérationnel :

- **Sessions** - `/sessions` - Sessions et associations PFCP
- **Règles** - `/rules` - Inspection des règles PDR, FAR, QER, URR
- **Tampons** - `/buffers` - Surveillance et contrôle des tampons de paquets
- **Statistiques** - `/statistics` - Statistiques sur les paquets, les routes, XDP et les interfaces
- **Capacité** - `/capacity` - Utilisation des cartes eBPF et surveillance de la capacité
- **Config** - `/upf_config` - Configuration UPF et adresses de plan de données
- **Routes** - `/routes` - Routes UE et sessions de protocole de routage (OSPF, BGP)
- **Capacités XDP** - `/xdp_capabilities` - Support du mode XDP et capacités de performance
- **Journaux** - `/logs` - Diffusion en direct des journaux

Vue des sessions

URL : `/sessions`

Fonctionnalités

La vue des sessions affiche toutes les sessions PFCP actives et les associations des instances OmniUPF sélectionnées.

Résumé des associations PFCP

Affiche toutes les associations PFCP actives (connexions de contrôle depuis SMF/PGW-C) :

Colonne	Description
ID de nœud	Identifiant de nœud SMF ou PGW-C (FQDN ou IP)
Adresse	Adresse IP SMF/PGW-C pour la communication PFCP
ID de session suivante	Prochain ID de session PFCP disponible pour cette association

Objectif :

- Vérifier la connectivité SMF vers UPF
- Surveiller le nombre de connexions de plan de contrôle
- Suivre l'allocation des ID de session par association

Tableau des sessions actives

Affiche toutes les sessions PFCP représentant des sessions PDU UE actives :

Colonne	Description
SEID local	Identifiant de point de terminaison de session attribué par UPF
SEID distant	Identifiant de point de terminaison de session attribué par SMF
IP UE	Adresse IPv4 ou IPv6 de l'équipement utilisateur
TEID	Identifiant de point de terminaison de tunnel GTP-U pour le trafic montant
PDRs	Nombre de règles de détection de paquets dans la session
FARs	Nombre de règles d'action de transfert dans la session
QERs	Nombre de règles d'application de QoS dans la session
URRs	Nombre de règles de rapport d'utilisation dans la session
Actions	Bouton d'expansion pour voir les informations détaillées sur les règles

Fonctionnalités :

- **Filtrer par IP** : Trouver des sessions pour une adresse IP UE spécifique
- **Filtrer par TEID** : Trouver des sessions par ID de point de terminaison de tunnel
- **Étendre la session** : Voir les détails JSON complets de PDR/FAR/QER/URR
- **Actualisation automatique** : Mises à jour toutes les 10 secondes

Vue de session étendue :

Lorsque vous cliquez sur "Étendre" sur une session, la vue montre :

- **Règles de détection de paquets (PDRs)** : JSON complet avec TEID, IP UE, ID FAR, ID QER, filtres SDF
  - **Les ID PDR sont cliquables** - Cliquez pour naviguer vers l'onglet Règles et voir les détails complets du PDR
  - Les PDRs montants (TEID ≠ 0) lient à la recherche de PDR montants
  - Les PDRs descendants (IPv4) lient à la recherche de PDR descendants
  - Les PDRs descendants (IPv6) lient à la recherche de PDR descendants IPv6
- **Règles d'action de transfert (FARs)** : Drapeaux d'action, création d'en-tête extérieur, points de terminaison de destination
- **Règles d'application de QoS (QERs)** : MBR, GBR, QFI et autres paramètres QoS
- **Règles de rapport d'utilisation (URRs)** : Compteurs de volume (montant, descendant, total d'octets)

Vue étendue de la session montrant les PDR, FAR et QER détaillés pour une session spécifique.

Cas d'utilisation

Vérifier la connectivité UE :

1. Naviguer vers la vue des sessions
2. Entrer l'adresse IP UE dans le filtre
3. Confirmer que la session existe avec le TEID correct
4. Étendre pour vérifier la configuration PDR/FAR

Surveiller le nombre de sessions :

- Vérifier le nombre total de sessions dans l'en-tête
- Comparer à travers plusieurs instances UPF
- Suivre la croissance des sessions au fil du temps

Dépanner les problèmes de session :

- Rechercher une IP UE ou un TEID spécifique
- Étendre la session pour inspecter la configuration des règles
- Vérifier les paramètres de transfert FAR
- Vérifier les paramètres QoS QER

Mises à jour en temps réel

La vue des sessions se rafraîchit automatiquement toutes les 10 secondes. Un indicateur de vérification de santé montre l'état de connectivité UPF :

- **SAIN** (vert) : UPF est accessible et répond
- **NON SAIN** (rouge) : UPF n'est pas accessible ou ne répond pas
- **INCONNU** (gris) : État de santé pas encore déterminé

Gestion des règles

URL : `/rules`

La vue des règles fournit une inspection complète de toutes les règles de détection de paquets, de transfert, d'application de QoS et de rapport

d'utilisation à travers toutes les sessions.

Onglet PDR - Règles de détection de paquets

Voir et inspecter tous les PDR dans le UPF avec **formulaires de recherche** et **navigation cliquable** :

PDRs montants (N3 → N6) :

- **Formulaire de recherche** : Rechercher par TEID pour voir les détails spécifiques du PDR montant
- **TEID** : ID de point de terminaison de tunnel GTP-U depuis gNB (cliquable - navigue vers la recherche)
- **ID FAR** : Règle d'action de transfert associée (cliquable - navigue vers l'onglet FAR)
- **ID QER** : Règle d'application de QoS associée (cliquable - navigue vers l'onglet QER)
- **ID URR** : Règles de rapport d'utilisation associées (cliquable - navigue vers l'onglet URR)
- **Suppression d'en-tête extérieur** : Drapeau de décapsulation GTP-U
- **Filtres SDF** : Règles de classification de flux de données de service

PDRs descendants (N6 → N3) :

- **Formulaire de recherche** : Rechercher par adresse IPv4 de l'UE pour voir les détails spécifiques du PDR descendant
- **IP UE** : Adresse IPv4 de l'équipement utilisateur (affichée dans les résultats de recherche)
- **ID FAR** : Règle d'action de transfert associée (cliquable - navigue vers l'onglet FAR)
- **ID QER** : Règle d'application de QoS associée (cliquable - navigue vers l'onglet QER)
- **ID URR** : Règles de rapport d'utilisation associées (cliquable - navigue vers l'onglet URR)
- **Mode SDF** : Mode de filtre de flux de données de service (aucun, sdf uniquement, sdf + par défaut)

- **Pagination** : Parcourir les PDR avec des contrôles de page (100 par page par défaut, maximum 1000)

PDRs descendants IPv6 :

- L'API prend en charge la pagination pour les PDRs descendants IPv6
- Même structure que pour IPv4 mais indexée par adresses IPv6
- Un onglet UI complet peut être ajouté si nécessaire

Onglet FAR - Règles d'action de transfert

Voir tous les FARs avec leurs actions de transfert et paramètres :

Fonctionnalités :

- **Formulaire de recherche** : Rechercher par ID FAR pour voir des détails spécifiques sur le FAR
- **Recherche automatique** : Cliquer sur les ID FAR depuis les détails PDR remplit automatiquement la recherche
- **Mises à jour en temps réel** : L'état du FAR reflète l'état actuel du tampon

Colonne	Description
ID FAR	Identifiant unique de la règle de transfert
Action	Drapeaux d'action de transfert (FORWARD, DROP, BUFFER, DUPLICATE, NOTIFY)
Tamponnage	État actuel du tampon (Activé/Désactivé)
Destination	Paramètres de création d'en-tête extérieur (TEID, adresse IP)

Drapeaux d'action FAR :

- **FORWARD (1)** : Transférer le paquet à la destination
- **DROP (2)** : Jeter le paquet

- **BUFFER (4)** : Stocker le paquet dans le tampon
- **NOTIFY (8)** : Envoyer une notification au plan de contrôle
- **DUPLICATE (16)** : Dupliquer le paquet vers plusieurs destinations

Basculer le tamponnage :

- Cliquez sur "Activer le tampon" ou "Désactiver le tampon" pour basculer le drapeau de tamponnage
- Utile pour le dépannage des scénarios de transfert
- Modifie immédiatement l'action FAR dans la carte eBPF

Onglet QER - Règles d'application de QoS

Voir les règles QoS appliquées aux flux de trafic :

Fonctionnalités :

- **Navigation cliquable** : Cliquez sur les ID QER depuis les détails PDR pour naviguer et mettre en surbrillance un QER spécifique
- **Auto-surlignage** : La ligne QER est surlignée lorsqu'elle est naviguée depuis un PDR
- **Pagination** : Parcourir les QERs avec des contrôles de page (100 par page par défaut, maximum 1000)

Colonne	Description
ID QER	Identifiant unique de la règle QoS (cliquable lorsqu'il est référencé depuis les PDRs)
MBR (Montant)	Débit maximum pour le trafic montant (kbps)
MBR (Descendant)	Débit maximum pour le trafic descendant (kbps)
GBR (Montant)	Débit garanti pour le trafic montant (kbps)
GBR (Descendant)	Débit garanti pour le trafic descendant (kbps)
QFI	Identifiant de flux QoS (marquage 5G)

Interprétation de la QoS :

- **MBR = 0** : Pas de limite de débit
- **GBR = 0** : Meilleure effort (pas de bande passante garantie)
- **GBR > 0** : Flux à débit garanti (priorisé)

Onglet URR - Règles de rapport d'utilisation

Voir les règles de suivi d'utilisation et les compteurs de volume :

Fonctionnalités :

- **Formulaire de recherche** : Rechercher par ID URR pour trouver et mettre en surbrillance un URR spécifique
- **Navigation cliquable** : Cliquez sur les ID URR depuis les détails PDR pour naviguer et mettre en surbrillance un URR spécifique
- **Auto-surlignage** : La ligne URR est surlignée en bleu lorsqu'elle est naviguée depuis un PDR ou recherchée via la recherche
- **Pagination** : Parcourir les URRs avec des contrôles de page (100 par page par défaut, maximum 1000)

Colonne	Description
ID URR	Identifiant unique de la règle de rapport d'utilisation (cliquable lorsqu'il est référencé depuis les PDRs)
Volume montant	Octets envoyés de l'UE vers le réseau de données
Volume descendant	Octets envoyés du réseau de données vers l'UE
Volume total	Total d'octets dans les deux directions
Actions	Bouton de suppression pour réinitialiser les compteurs pour cet URR

Affichage du volume :

- Formaté automatiquement (B, Ko, Mo, Go, To)
- Compteurs en temps réel mis à jour à chaque actualisation
- Utilisé pour la facturation et l'analyse

Filtrage :

- Affiche uniquement les URRs avec un volume non nul
- Les URRs inactifs (tous les compteurs à 0) sont filtrés pour des performances optimales

Cas d'utilisation

Inspecter la classification du trafic :

1. Naviguer vers Règles → onglet PDR
2. Rechercher un TEID ou une IP UE spécifique
3. Vérifier que le PDR s'associe au FAR et au QER corrects

Dépanner les problèmes de transfert :

1. Naviguer vers Règles → onglet FAR
2. Localiser l'ID FAR depuis le PDR de session
3. Vérifier que l'action est FORWARD (pas DROP ou BUFFER)
4. Vérifier les paramètres de création d'en-tête extérieur

Surveiller l'application de la QoS :

1. Naviguer vers Règles → onglet QER
2. Vérifier que les valeurs MBR et GBR correspondent à la politique
3. Vérifier le marquage QFI pour les flux 5G

Suivre l'utilisation des données :

1. Naviguer vers Règles → onglet URR
2. Trier par volume total pour trouver les utilisateurs les plus élevés
3. Surveiller la croissance du volume au fil du temps
4. Vérifier l'intégration de la facturation

Gestion des tampons

URL : `/buffers`

Fonctionnalités

La vue des tampons affiche les tampons de paquets maintenus par le UPF lors d'événements de mobilité ou de changements de chemin.

Statistiques totales

Le tableau de bord affiche des statistiques agrégées des tampons :

- **Total des paquets** : Nombre de paquets mis en tampon à travers tous les FARs
- **Total des octets** : Taille totale des données mises en tampon
- **Total des FARs** : Nombre de FARs avec des paquets mis en tampon
- **Max par FAR** : Nombre maximum de paquets autorisés par FAR
- **Max total** : Nombre maximum total de paquets mis en tampon

- **TTL des paquets** : Durée de vie des paquets mis en tampon (secondes)

Tampons par FAR

Tableau de tous les FARs avec des paquets mis en tampon :

Colonne	Description
ID FAR	Identifiant de la règle d'action de transfert
Nombre de paquets	Nombre de paquets mis en tampon pour ce FAR
Nombre d'octets	Total d'octets mis en tampon pour ce FAR
Paquet le plus ancien	Horodatage du paquet mis en tampon le plus ancien
Paquet le plus récent	Horodatage du paquet mis en tampon le plus récent
Actions	Boutons de contrôle des tampons (style pilule)

Actions de contrôle des tampons

Pour chaque FAR avec des paquets mis en tampon, les boutons de style pilule suivants sont disponibles :

Contrôle du tamponnage :

- **Désactiver le tampon** (rouge) : Désactiver le tamponnage pour ce FAR (met à jour le drapeau d'action FAR)
- **Activer le tampon** (violet) : Activer le tamponnage pour ce FAR

Opérations sur les tampons :

- **Vider** (bleu) : Rejouer tous les paquets mis en tampon en utilisant les règles FAR actuelles
- **Effacer** (gris) : Supprimer tous les paquets mis en tampon sans transfert

Effacer tous les tampons :

- Bouton rouge "Effacer tout" dans l'en-tête
- Efface les tampons pour tous les FARs
- Nécessite une confirmation

Cas d'utilisation

Surveiller le tamponnage lors des transferts :

1. Pendant le transfert, vérifier que les paquets sont mis en tampon
2. Vérifier l'état de tamponnage du FAR (doit être activé)
3. Surveiller le nombre de paquets et leur ancienneté

Compléter le transfert :

1. Après le changement de chemin, cliquer sur "Vider" pour rejouer les paquets mis en tampon
2. Vérifier que les paquets sont transférés vers le nouveau chemin
3. Cliquer sur "Désactiver le tampon" pour arrêter le tamponnage

Effacer les tampons bloqués :

1. Identifier les FARs avec des paquets mis en tampon anciens (vérifier l'horodatage le plus ancien)
2. Cliquer sur "Effacer" pour jeter les paquets obsolètes
3. Ou cliquer sur "Désactiver le tampon" pour empêcher un tamponnage supplémentaire

Dépanner les débordements de tampon :

1. Vérifier le nombre total de paquets par rapport au maximum total
2. Identifier les FARs avec un tamponnage excessif
3. Vérifier que le SMF a envoyé une modification de session pour désactiver le tamponnage
4. Désactiver manuellement le tamponnage si la commande SMF a été manquée

Mises à jour en temps réel

La vue des tampons se rafraîchit automatiquement toutes les 5 secondes pour montrer l'état actuel des tampons.

Tableau de bord des statistiques

URL : `/statistics`

Fonctionnalités

La vue des statistiques fournit des métriques de performance en temps réel du plan de données OmniUPF. Pour des informations détaillées sur les métriques Prometheus, voir la **Référence des métriques**.

Statistiques des paquets

Compteurs agrégés de traitement des paquets :

- **Paquets RX** : Total des paquets reçus sur toutes les interfaces
- **Paquets TX** : Total des paquets transmis sur toutes les interfaces
- **Paquets perdus** : Paquets rejetés en raison d'erreurs ou de politiques
- **Paquets GTP-U** : Paquets traités avec encapsulation GTP-U

Utilisation : Surveiller la charge de trafic globale du UPF et le taux de perte de paquets

Statistiques des routes

Métriques de transfert par route (si disponibles) :

- **Hits de route** : Paquets correspondant à chaque règle de routage
- **Succès de transfert** : Nombre de paquets transférés avec succès
- **Erreurs de transfert** : Tentatives de transfert échouées

Utilisation : Identifier les routes chargées et les erreurs de transfert

Statistiques XDP

Métriques de performance du chemin de données eXpress (XDP) :

- **XDP Traités** : Total des paquets traités au niveau XDP
- **XDP Passés** : Paquets envoyés à la pile réseau
- **XDP Perdus** : Paquets perdus au niveau XDP
- **XDP Abandonnés** : Erreurs de traitement dans le programme XDP

Utilisation : Surveiller la performance XDP et détecter les erreurs de traitement

Causes de perte XDP :

- Format de paquet invalide
- Échec de recherche dans la carte eBPF
- Pertes basées sur des politiques
- Épuisement des ressources

Statistiques des interfaces N3/N6

Compteurs de trafic par interface :

Interface N3 (connectivité RAN) :

- **RX N3** : Paquets reçus de gNB/eNodeB
- **TX N3** : Paquets transmis à gNB/eNodeB

Interface N6 (connectivité au réseau de données) :

- **RX N6** : Paquets reçus du réseau de données (Internet/IMS)
- **TX N6** : Paquets transmis au réseau de données

Total : Compte agrégé de paquets à travers les interfaces

Utilisation : Surveiller l'équilibre du trafic et les problèmes spécifiques à l'interface

Cas d'utilisation

Surveiller la charge de trafic :

1. Vérifier les taux RX/TX de paquets
2. Vérifier que le trafic circule dans les deux directions
3. Comparer le trafic N3 par rapport au trafic N6 (devrait être à peu près égal)

Détecter les pertes de paquets :

1. Vérifier le compteur de paquets perdus
2. Examiner le compteur de paquets perdus XDP
3. Enquêter sur la cause dans les journaux si les pertes sont élevées

Analyse de performance :

1. Surveiller le ratio de paquets traités par rapport à ceux passés par XDP
2. Vérifier les abandons XDP (indique des erreurs)
3. Vérifier la distribution du trafic des interfaces N3/N6

Planification de capacité :

1. Suivre le taux de paquets au fil du temps
2. Comparer aux limites de capacité du UPF
3. Planifier une montée en charge si les limites sont approchées

Mises à jour en temps réel

Les statistiques se rafraîchissent automatiquement toutes les 5 secondes.

Surveillance de la capacité

URL : `/capacity`

Fonctionnalités

La vue de capacité affiche l'utilisation des cartes eBPF et les limites de capacité pour toutes les cartes dans le chemin de données UPF.

Tableau d'utilisation des cartes eBPF

Tableau de toutes les cartes eBPF avec des informations d'utilisation :

Colonne	Description
Nom de la carte	Nom de la carte eBPF (par exemple, `uplink_pdr_map`, `far_map`)
Utilisé	Nombre d'entrées actuellement dans la carte
Capacité	Nombre maximum d'entrées autorisées dans la carte
Utilisation	Barre de progression visuelle avec pourcentage
Taille de la clé	Taille des clés de la carte en octets
Taille de la valeur	Taille des valeurs de la carte en octets

Indicateurs d'utilisation codés par couleur

La barre de progression d'utilisation est codée par couleur en fonction de l'utilisation :

- **Vert (<50%)** : Fonctionnement normal, capacité ample
- **Jaune (50-70%)** : Prudence, surveiller la croissance
- **Amber (70-90%)** : Avertissement, planifier une augmentation de capacité
- **Rouge (>90%)** : Critique, action immédiate requise

Cartes critiques à surveiller

uplink_pdr_map :

- Stocke les PDRs montants indexés par TEID
- Une entrée par flux de trafic montant
- **Critique** : L'épuisement empêche l'établissement de nouvelles sessions

downlink_pdr_map / **downlink_pdr_map_ip6** :

- Stocke les PDRs descendants indexés par adresse IP UE
- Une entrée par adresse IPv4/IPv6 de l'UE
- **Critique** : L'épuisement empêche l'établissement de nouvelles sessions

far_map :

- Stocke les règles d'action de transfert indexées par ID FAR
- Partagé entre plusieurs PDRs
- **Haute priorité** : Affecte les décisions de transfert

qer_map :

- Stocke les règles d'application de QoS indexées par ID QER
- **Priorité moyenne** : Affecte la QoS mais pas la connectivité de base

urr_map :

- Stocke les règles de rapport d'utilisation indexées par ID URR
- **Priorité basse** : Affecte la facturation mais pas la connectivité

Cas d'utilisation

Planification de capacité :

1. Surveiller les tendances d'utilisation des cartes au fil du temps
2. Identifier quelles cartes croissent le plus rapidement
3. Planifier des augmentations de capacité avant d'atteindre les limites

Prévenir les échecs d'établissement de session :

1. Vérifier l'utilisation de la carte PDR avant une augmentation de trafic attendue
2. Augmenter la capacité de la carte si elle approche des limites
3. Surveiller après l'augmentation de capacité pour vérifier

Dépanner les échecs de session :

1. Lorsque l'établissement de session échoue, vérifier la vue de capacité

2. Si les cartes PDR sont rouges (>90%), la capacité est épuisée
3. Augmenter la capacité de la carte ou effacer les sessions obsolètes

Optimiser la configuration des cartes :

1. Examiner les tailles de clé et de valeur
2. Calculer l'utilisation de la mémoire par carte
3. Optimiser les tailles de carte en fonction des modèles d'utilisation réels

Configuration de capacité

Les capacités des cartes eBPF sont configurées au démarrage du UPF dans le fichier de configuration UPF. Valeurs typiques :

- Petit déploiement : 10 000 - 100 000 entrées par carte
- Déploiement moyen : 100 000 - 1 000 000 entrées par carte
- Grand déploiement : 1 000 000+ entrées par carte

Calcul de mémoire :

```
Mémoire de la carte = (Taille de clé + Taille de valeur) ×
Capacité
```

Par exemple, une carte PDR avec 1 million d'entrées et des valeurs de 64 octets utilise environ 64 Mo de mémoire du noyau.

Mises à jour en temps réel

La vue de capacité se rafraîchit automatiquement toutes les 10 secondes.

Vue de configuration

URL : `/upf_config`

Fonctionnalités

La vue de configuration affiche les paramètres opérationnels du UPF et la configuration du plan de données.

Configuration UPF

Affiche la configuration statique du UPF :

- **Interface PFCP** : Adresse IP et port pour la connectivité SMF/PGW-C
- **Interface N3** : Adresse IP pour la connectivité RAN (gNB/eNodeB)
- **Interface N6** : Adresse IP pour la connectivité au réseau de données
- **Interface N9** : Adresse IP pour la communication inter-UPF (optionnelle)
- **Port API** : Port d'écoute de l'API REST
- **Version** : Version du logiciel OmniUPF

Configuration du plan de données (eBPF)

Affiche les paramètres actifs du plan de données en temps réel :

- **Adresse N3 active** : Liaison de l'interface N3 en temps réel
- **Adresse N9 active** : Liaison de l'interface N9 en temps réel (si activée)

Ces valeurs reflètent la configuration réelle du chemin de données eBPF et peuvent différer de la configuration statique si les interfaces ont été modifiées.

Cas d'utilisation

Vérifier la connectivité UPF :

1. Vérifier que l'adresse IP de l'interface N3 correspond à la configuration gNB
2. Vérifier que l'interface N6 peut acheminer vers le réseau de données
3. Confirmer que l'interface PFCP est accessible depuis le SMF

Dépanner les problèmes d'interface :

1. Comparer la configuration statique avec les adresses actives du plan de données

2. Vérifier que les interfaces sont correctement liées
3. Vérifier les modifications de configuration des interfaces

Documentation et audit :

1. Enregistrer la configuration UPF pour documentation
2. Vérifier que le déploiement correspond aux spécifications de conception
3. Auditer les affectations d'interface

Vue des routes

URL : `/routes`

Fonctionnalités

La vue des routes fournit une surveillance complète des routes IP de l'équipement utilisateur (UE) et des sessions de protocole de routage (OSPF et BGP).

Aperçu de l'état des routes

Le tableau de bord affiche des statistiques agrégées des routes :

- **État** : Routage activé ou désactivé
- **Total des routes** : Nombre total de routes IP UE
- **Synchronisé** : Nombre de routes synchronisées avec succès
- **Échoué** : Nombre de routes qui ont échoué à se synchroniser

Routes IP UE actives

Tableau affichant toutes les routes IP de l'équipement utilisateur actives :

Colonne	Description
Index	Numéro d'index de la route
Adresse IP UE	Adresse IPv4 ou IPv6 assignée à l'UE

Objectif :

- Voir toutes les adresses IP UE qui ont des routes configurées
- Vérifier la distribution des routes aux protocoles de routage
- Surveiller l'état de synchronisation des routes

Voisins OSPF

Tableau des voisins du protocole OSPF (Open Shortest Path First) :

Colonne	Description
ID de voisin	Identifiant du routeur OSPF
Adresse	Adresse IP du voisin OSPF
Interface	Interface utilisée pour l'adjacence OSPF
État	État d'adjacence OSPF (Full, Init, etc.)
Priorité	Valeur de priorité OSPF
Temps de fonctionnement	Durée pendant laquelle le voisin est actif
Temps mort	Temps avant que le voisin soit considéré comme mort

États OSPF :

- **Full** (vert) : Complètement adjacent et échangeant des informations de routage
- **Autres états** (jaune) : Adjacence en formation ou incomplète

Pairs BGP

Tableau des pairs BGP (Border Gateway Protocol) :

Colonne	Description
Adresse IP de voisin	Adresse IP du pair BGP
ASN	Numéro de système autonome du pair
État	État de session BGP (Établi, Inactif, etc.)
Up/Down	Durée de l'état actuel
Préfixes reçus	Nombre de préfixes de route reçus du pair
Msg envoyés	Total des messages BGP envoyés au pair
Msg reçus	Total des messages BGP reçus du pair

États BGP :

- **Établi** (vert) : Session BGP active, échangeant des routes
- **Autres états** (rouge) : Session inactive ou en cours d'établissement

L'en-tête affiche également l'ID de routeur BGP local et l'ASN lorsque BGP est configuré.

Routes redistribuées OSPF

Tableau montrant les LSA externes OSPF (Link State Advertisements) pour les routes UE redistribuées :

Colonne	Description
ID d'état de lien	Identifiant LSA (généralement l'adresse réseau)
Masque	Masque de réseau pour la route
Routeur annonçant	ID du routeur annonçant cette route externe
Type de métrique	Type de métrique externe OSPF (E1 ou E2)
Métrique	Coût de métrique OSPF pour la route
Âge	Temps écoulé depuis que le LSA a été originaire (secondes)
Numéro de séquence	Numéro de séquence LSA pour le versionnage

Objectif :

- Vérifier que les routes UE sont redistribuées dans OSPF
- Surveiller quel routeur annonce des routes externes
- Suivre l'âge et les mises à jour des LSA

Actions de contrôle des routes

Bouton Synchroniser les routes :

- Déclenche manuellement la synchronisation des routes vers FRR (Free Range Routing)
- Force la mise à jour du protocole de routage avec les routes UE actuelles
- Utile après des modifications de configuration ou pour récupérer des échecs de synchronisation

Bouton Actualiser :

- Actualiser manuellement toutes les informations de route

- Met à jour les voisins OSPF, les pairs BGP et les tables de routage

Cas d'utilisation

Surveiller la santé du protocole de routage :

1. Naviguer vers la vue des routes
2. Vérifier les états des voisins OSPF (doivent être "Full")
3. Vérifier que les pairs BGP sont "Établis"
4. Confirmer le nombre attendu de voisins/pairs

Vérifier la distribution des routes UE :

1. Vérifier le tableau des routes IP UE actives pour un UE spécifique
2. Faire défiler vers la section des routes redistribuées OSPF
3. Vérifier que la route UE apparaît dans les LSA externes
4. Confirmer que le routeur annonçant correspond à l'UPF attendu

Dépanner les problèmes de synchronisation des routes :

1. Vérifier les compteurs Synchronisés vs. Échoués dans l'aperçu de l'état
2. Si les routes échouent, cliquer sur le bouton "Synchroniser les routes"
3. Surveiller les messages d'erreur dans la bannière rouge si la synchronisation échoue
4. Vérifier les messages d'erreur OSPF/BGP dans les sections respectives

Vérifier le déploiement multi-UPF :

1. Sélectionner différentes instances UPF dans le menu déroulant
2. Comparer les comptes de routes entre les instances
3. Vérifier que les voisins OSPF se voient
4. Vérifier les relations de pairage BGP

Surveiller l'évolutivité des routes :

1. Suivre le compte total de routes à mesure que les sessions UE augmentent
2. Vérifier que les routes sont distribuées aux protocoles de routage
3. Surveiller la croissance du compte LSA OSPF

4. Vérifier le compte de préfixes BGP reçus par les pairs

Mises à jour en temps réel

La vue des routes se rafraîchit automatiquement toutes les 10 secondes pour montrer l'état actuel du protocole de routage et les routes UE.

Intégration de routage

La vue des routes s'intègre avec FRR (Free Range Routing) exécuté sur le UPF :

- **OSPF** : Les routes sont redistribuées en tant que LSA externes de type 2
- **BGP** : Les routes sont annoncées aux pairs BGP configurés
- **Mécanisme de synchronisation** : Les appels API REST déclenchent des commandes vtysh pour mettre à jour FRR

Vue des capacités XDP

URL : `/xdp_capabilities`

Fonctionnalités

La vue des capacités XDP affiche le support des modes eXpress Data Path (XDP), les capacités de performance et les calculs de débit pour le plan de données UPF.

Configuration de l'interface

Affiche des informations sur l'interface réseau et le pilote :

Champ	Description
Nom de l'interface	Interface réseau utilisée pour XDP (par exemple, eth0, ens1f0)
Pilote	Nom du pilote réseau (par exemple, i40e, ixgbe, virtio_net)
Version du pilote	Chaîne de version du pilote
Mode actuel	Mode XDP actif (DRV, SKB ou AUCUN)
Nombre de files d'attente multiples	Nombre de paires de files d'attente NIC pour le traitement parallèle

Modes XDP

La vue affiche tous les modes XDP avec leur statut de support et leurs caractéristiques de performance :

XDP_DRV (Mode Pilote) :

- **Performance** : ~5-10 Mpps (millions de paquets par seconde)
- **Description** : Support XDP natif dans le pilote, performance maximale
- **Nécessite** : Pilote NIC avec support XDP natif (i40e, ixgbe, mlx5, etc.)
- **Statut** : Supporté si le pilote a des hooks XDP
- **Indicateur** : Coche verte (✓) si supporté, X rouge (✗) si non

XDP_SKB (Mode Générique) :

- **Performance** : ~1-2 Mpps
- **Description** : Mode de secours utilisant la pile réseau du noyau
- **Nécessite** : Toute interface réseau
- **Statut** : Toujours supporté
- **Indicateur** : Coche verte (✓)

Indicateur de mode actuel :

- Point bleu à côté du mode XDP actuellement actif
- Montre quel mode est réellement utilisé

Raisons de non-support des modes :

- Si un mode n'est pas supporté, le champ "Raison" explique pourquoi
- Raisons courantes : le pilote manque de support XDP, incompatibilité de type d'interface

Vue des capacités XDP montrant la configuration de l'interface, les modes supportés et le calculateur de débit interactif Mpps

Recommandations

La vue affiche une bannière de recommandation colorée en fonction de la configuration actuelle :

Vert (Optimal) :

- "✓ Optimal : mode XDP_DRV activé avec support natif du pilote"
- Le mode de performance le plus élevé est actif

Jaune (Avertissement) :

- "⚠ Envisagez de passer au mode XDP_DRV pour de meilleures performances"
- Fonctionnement en mode générique lorsque le mode pilote est disponible
- "⚠ Avertissement : XDP_DRV non supporté par ce pilote"
- Limitations matérielles empêchent une performance optimale

Bleu (Information) :

- Informations générales sur la configuration XDP

Calculateur de performance Mpps

Calculateur interactif pour convertir le taux de paquets (Mpps) en débit (Gbps) :

Paramètres d'entrée

Taux de paquets (Mpps) :

- Plage : 0,1 - 100 Mpps
- Par défaut : Maximum Mpps pour le mode XDP actuel
- Représente des millions de paquets traités par seconde

Taille de paquet moyenne (octets) :

- Plage : 64 - 9000 octets
- Par défaut : 1200 octets (paquet GTP typique)
- Inclut le paquet complet avec encapsulation GTP

Boutons de préréglage rapide :

- **64B (min)** : Taille minimale de trame Ethernet
- **128B** : Petits paquets
- **256B** : Plan de contrôle ou signalisation
- **512B** : Paquets de taille moyenne
- **1024B** : Grands paquets
- **1518B (max)** : Taille maximale de trame Ethernet sans trames jumbo

Résultats du calcul

Débit total (Gbps) :

- Débit à la vitesse de ligne incluant tous les en-têtes
- Formule : `Gbps = Mpps × Packet_Size × 8 / 1000`
- Inclut les en-têtes GTP, UDP, IP et Ethernet

Débit de données utilisateur (Gbps) :

- Débit réel de charge utile utilisateur
- Exclut ~50 octets de surcharge d'encapsulation GTP
- Formule : `Gbps = Mpps × (Packet_Size - 50) / 1000`

Taux de paquets :

- Affiche Mpps et paquets/sec avec séparateur de milliers
- Exemple : 10 Mpps = 10 000 000 paquets/sec

Affichage de la formule :

- Montre la décomposition du calcul étape par étape
- Exemple : `10 Mpps × 1200 octets × 8 bits/octet ÷ 1000 = 96 Gbps`

Comprendre Mpps

La vue comprend une section d'explication couvrant :

Qu'est-ce que Mpps :

- Millions de paquets par seconde
- Indicateur clé de performance de traitement des paquets
- Indépendant de la taille des paquets

Relation avec le débit :

- Même Mpps avec des paquets plus grands = débit Gbps plus élevé
- Même Mpps avec des paquets plus petits = débit Gbps plus bas
- Le débit dépend à la fois du taux et de la taille des paquets

Surcharge d'encapsulation GTP :

- En-tête Ethernet : 14 octets
- En-tête IP : 20 octets (IPv4) ou 40 octets (IPv6)
- En-tête UDP : 8 octets
- En-tête GTP : 8 octets (minimum)
- Surcharge totale typique : ~50 octets par paquet

Cas d'utilisation

Évaluer la performance XDP :

1. Naviguer vers la vue des capacités XDP
2. Vérifier le mode XDP actuel (doit être DRV pour la meilleure performance)
3. Noter la plage de performance Mpps
4. Examiner la bannière de recommandation

Calculer le débit attendu :

1. Entrer le taux de paquets attendu en Mpps
2. Entrer la taille de paquet moyenne pour votre profil de trafic
3. Examiner le débit calculé en Gbps
4. Comparer à la capacité de lien ou aux exigences de performance

Optimiser la configuration XDP :

1. Vérifier si le mode XDP_DRV est supporté mais non actif
2. Examiner la version du pilote et la compatibilité
3. Suivre la recommandation pour passer au mode pilote si disponible
4. Vérifier que le nombre de files d'attente multiples correspond aux cœurs CPU

Planification de capacité :

1. Utiliser le calculateur pour déterminer le Mpps requis pour le débit cible
2. Comparer aux capacités du mode XDP actuel
3. Déterminer si une mise à niveau matérielle est nécessaire

4. Planifier la sélection d'interface et de pilote pour les nouveaux déploiements

Dépanner les problèmes de performance :

1. Vérifier que le mode XDP est DRV, pas SKB
2. Vérifier la version du pilote pour des problèmes de performance connus
3. Vérifier que le nombre de files d'attente multiples est suffisant
4. Calculer si le mode actuel supporte le débit requis

Conseils d'optimisation de performance

Mode Pilote (XDP_DRV) :

- Utiliser des NIC avec support XDP natif (Intel i40e/ixgbe, Mellanox mlx5)
- Mettre à jour les pilotes NIC à la dernière version
- Activer les files d'attente multiples (RSS) pour le traitement parallèle
- Ajuster les tailles des tampons de la NIC

Mode Générique (XDP_SKB) :

- Acceptable pour le développement et les tests
- Pas recommandé pour la production à haut débit
- Envisager une mise à niveau matérielle pour les déploiements de production

Configuration de files d'attente multiples :

- Le nombre de files d'attente doit correspondre ou dépasser le nombre de cœurs CPU
- Permet un traitement parallèle des paquets à travers les cœurs
- Distribue la charge via RSS (Receive Side Scaling)

Mises à jour en temps réel

La vue des capacités XDP se rafraîchit toutes les 30 secondes pour mettre à jour l'état de l'interface et les informations de mode.

Visionneuse de journaux

URL : `/logs`

Fonctionnalités

Voir les journaux de l'application OmniUPF en temps réel depuis le panneau de contrôle.

Fonctionnalités :

- Diffusion en direct des journaux via Phoenix LiveView
- Mises à jour en temps réel à mesure que les journaux sont générés
- Historique des journaux défilable
- Utile pour le dépannage lors de sessions actives

Niveaux de journaux

Les journaux OmniUPF utilisent les niveaux de journalisation standard d'Elixir :

- **DEBUG** : Informations de diagnostic détaillées
- **INFO** : Messages d'information généraux (par défaut)
- **WARNING** : Messages d'avertissement pour des problèmes non critiques
- **ERROR** : Messages d'erreur pour des échecs

Cas d'utilisation

Dépanner l'établissement de session :

1. Ouvrir la vue des journaux
2. Initier l'établissement de session depuis le SMF
3. Surveiller les journaux de messages PFCP et d'éventuelles erreurs

Surveiller la communication PFCP :

1. Voir les messages de configuration d'association PFCP
2. Suivre la création/modification/suppression de session

3. Vérifier les messages de heartbeat

Déboguer les problèmes de transfert :

1. Rechercher des erreurs de traitement des paquets
2. Vérifier les journaux d'opération de la carte eBPF
3. Identifier les problèmes de configuration FAR/PDR

Meilleures pratiques

Directives opérationnelles

Surveillance :

- Vérifier régulièrement la vue de capacité pour prévenir l'épuisement des cartes
- Surveiller les statistiques pour des modèles de trafic inhabituels ou des pertes
- Suivre la croissance du nombre de sessions au fil du temps
- Surveiller les erreurs de traitement XDP

Gestion des tampons :

- Surveiller les tampons lors des scénarios de transfert
- Effacer les tampons bloqués si les paquets dépassent le TTL
- Vérifier que le tamponnage est désactivé après la fin du transfert
- Utiliser "Vider" au lieu de "Effacer" pour éviter la perte de paquets

Gestion des sessions :

- Utiliser des filtres pour localiser rapidement des sessions UE spécifiques
- Étendre les sessions pour vérifier la configuration des règles
- Comparer les sessions à travers plusieurs instances UPF
- Vérifier l'indicateur de santé avant le dépannage

Dépannage :

- Utiliser les journaux pour le débogage en temps réel
- Vérifier la vue des sessions pour vérifier la connectivité UE
- Vérifier la configuration des règles pour les flux de trafic
- Surveiller les statistiques pour des pertes de paquets ou des erreurs de transfert

Performance

- L'actualisation automatique du panneau de contrôle est de 5 à 10 secondes selon la vue
- De grandes listes de sessions peuvent prendre du temps à charger
- Les filtres de la vue des règles par les entrées actives (volumes non nuls pour les URRs)
- Les opérations sur les tampons s'exécutent immédiatement sur le UPF sélectionné

Documentation connexe

- **Guide de gestion des règles** - Configuration PDR, FAR, QER, URR
- **Guide de surveillance** - Statistiques, métriques et planification de capacité
- **Référence des métriques** - Référence complète des métriques Prometheus
- **Codes de cause PFCP** - Codes d'erreur PFCP et diagnostics de session
- **Documentation API** - Référence API REST et pagination
- **Guide des routes** - Détails sur le routage UE et l'intégration FRR
- **Guide des modes XDP** - Documentation détaillée sur les modes XDP et informations eBPF
- **Guide de dépannage** - Problèmes courants et diagnostics
- **Guide des opérations UPF** - Opérations générales et architecture UPF

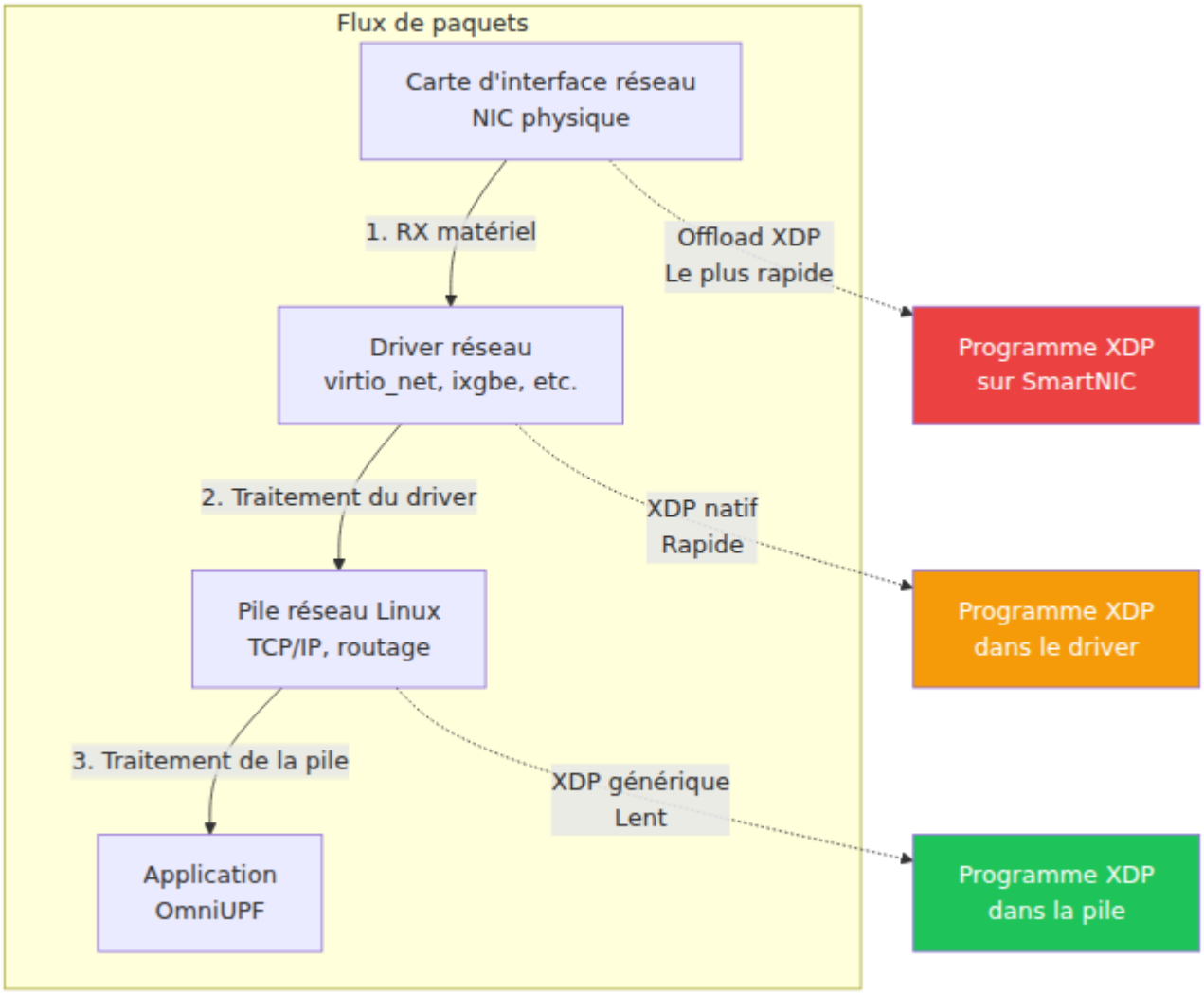
Modes de connexion XDP pour OmniUPF

Table des matières

Aperçu

OmniUPF utilise **XDP (eXpress Data Path)** pour le traitement des paquets à haute performance. XDP est une technologie du noyau Linux qui permet aux programmes de traitement de paquets (eBPF) de s'exécuter au point le plus précoce possible dans la pile réseau, offrant une latence au niveau des microsecondes et un débit de millions de paquets par seconde.

Le mode de connexion XDP détermine **où** dans le chemin des paquets le programme eBPF s'exécute :



Choisir le bon mode XDP a un impact significatif sur les performances d'OmniUPF et détermine si vous pouvez atteindre un traitement de paquets de qualité production.

Comparaison des modes XDP

Aspect	Mode générique	Mode natif	Mode d'offloa
Point de connexion	Pile réseau Linux	Driver réseau	Matériel NIC
Performance	~1-2 Mpps	~5-10 Mpps	~10-40 Mpps
Latence	~100 µs	~10 µs	~1 µs
Utilisation CPU	Élevée	Moyenne	Faible
Exigences NIC	Toute NIC	Driver compatible XDP	SmartNIC avec support XDP
Support hyperviseur	Tous les hyperviseurs	La plupart (nécessite multi-queue)	Rare (PCI passthrough)
Cas d'utilisation	Test, développement	**Production (recommandé)**	Sites de périphérie à haut débit
Configuration	`xdp_attach_mode: generic`	`xdp_attach_mode: native`	`xdp_attach_mode offload`

Recommandation : Utilisez le **mode natif** pour les déploiements en production. Le mode générique n'est adapté qu'aux tests.

Mode générique (par défaut)

Description

XDP générique exécute le programme eBPF dans la pile réseau Linux **après** que le driver ait traité le paquet. C'est le mode XDP le plus lent mais il fonctionne avec n'importe quelle interface réseau.

Caractéristiques de performance

- **Débit** : ~1-2 millions de paquets par seconde (Mpps)
- **Latence** : ~100 microsecondes par paquet
- **Surcharge CPU** : Élevée (paquet copié dans la pile du noyau avant XDP)

Quand l'utiliser

- **Développement et tests** uniquement
- **Environnements de laboratoire** où la performance n'a pas d'importance
- **Déploiement initial** pour vérifier la fonctionnalité avant d'optimiser

Configuration

```yaml
# config.yaml
interface_name: [eth0]
xdp_attach_mode: generic  # Mode par défaut
```

Avertissement : Le mode générique est **non adapté à la production**. Il créera un goulet d'étranglement à des taux de paquets élevés et gaspillera des ressources CPU.

Mode natif (recommandé pour la production)

Description

XDP natif exécute le programme eBPF **à l'intérieur du driver réseau**, avant que les paquets n'atteignent la pile réseau Linux. Cela offre des performances proches du matériel tout en maintenant la flexibilité au niveau du noyau.

Caractéristiques de performance

- **Débit** : ~5-10 millions de paquets par seconde (Mpps) par cœur
- **Latence** : ~10 microsecondes par paquet
- **Surcharge CPU** : Faible (paquet traité au niveau du driver)
- **Mise à l'échelle** : Mise à l'échelle linéaire avec les cœurs CPU et les files d'attente NIC

Quand l'utiliser

- **Déploiements en production** (recommandé)
- **Réseaux de niveau opérateur** nécessitant un haut débit
- **Scénarios de calcul en périphérie** avec des exigences de performance
- **Tout déploiement** où la performance est importante

Exigences du driver NIC

XDP natif nécessite un driver réseau avec support XDP. La plupart des NIC modernes supportent XDP natif :

NIC physiques (bare metal) :

- Intel : `ixgbe` (10G), `i40e` (40G), `ice` (100G)
- Broadcom : `bnxt_en`
- Mellanox : `mlx4_en`, `mlx5_core`
- Netronome : `nfp` (avec support d'offload)

- Marvell : `mvneta`, `mvpp2`

NIC virtuels (hyperviseurs) :

- VirtIO : `virtio_net` (KVM, Proxmox, OpenStack) ✓
- VMware : `vmxnet3` ✓
- Microsoft : `hv_netvsc` (Hyper-V) ✓
- Amazon : `ena` (AWS) ✓
- SR-IOV : `ixgbevf`, `i40evf` (PCI passthrough) ✓

Remarque : VirtualBox ne supporte **pas** XDP natif (utilisez uniquement le mode générique).

Configuration

```
# config.yaml
interface_name: [eth0]
xdp_attach_mode: native
```

Exigence de multi-queue : Pour des performances optimales, activez le multi-queue sur les NIC virtuels (voir la section Proxmox ci-dessous).

Mode d'offload (SmartNIC)

Description

XDP d'offload exécute le programme eBPF **directement sur le matériel NIC** (SmartNIC), contournant complètement le CPU pour le traitement des paquets. Cela offre les meilleures performances mais nécessite du matériel spécialisé.

Caractéristiques de performance

- **Débit** : ~10-40 millions de paquets par seconde (Mpps)
- **Latence** : ~1 microseconde par paquet

- **Surcharge CPU** : Pratiquement nulle (traitement sur NIC)

Quand l'utiliser

- **Déploiements à ultra-haut débit** (10G+ par instance UPF)
- **Sites de périphérie** avec accélération matérielle
- **Déploiements sensibles aux coûts** (réduire les exigences CPU)

Exigences matérielles

Seules les SmartNICs Netronome Agilio supportent actuellement l'offload XDP :

- Netronome Agilio CX 10G/25G/40G/100G

Remarque : Le mode d'offload nécessite un déploiement **bare metal** ou **PCI passthrough** - non disponible dans les configurations VM standard.

Configuration

```
# config.yaml
interface_name: [eth0]
xdp_attach_mode: offload
```

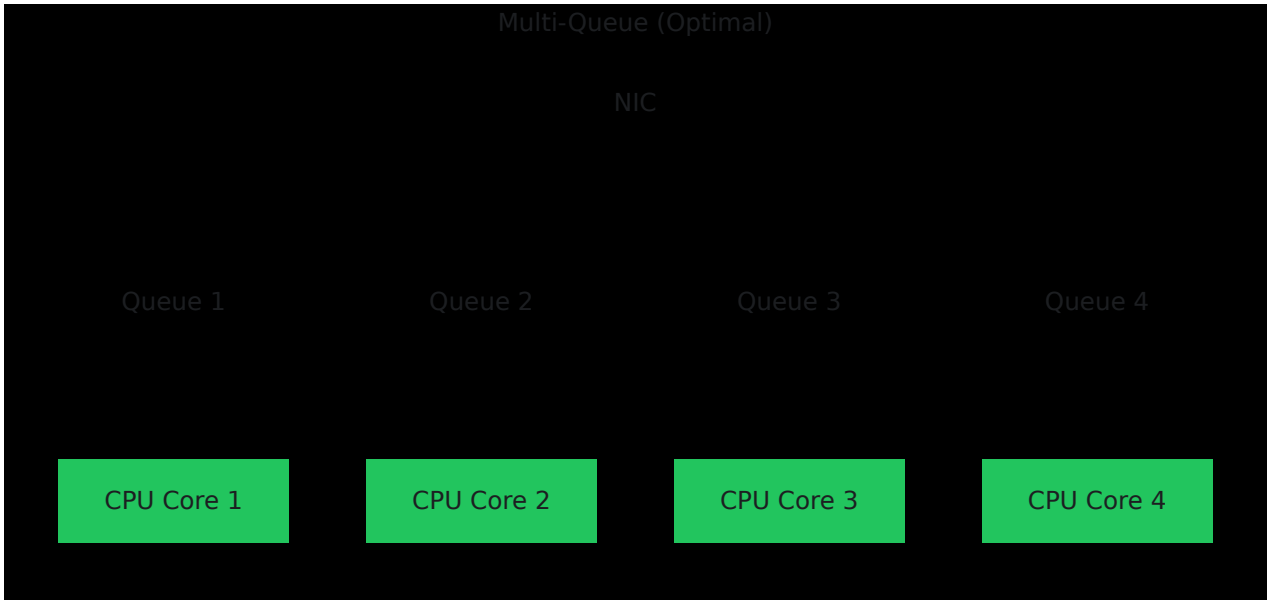
Activation de XDP natif sur Proxmox VE

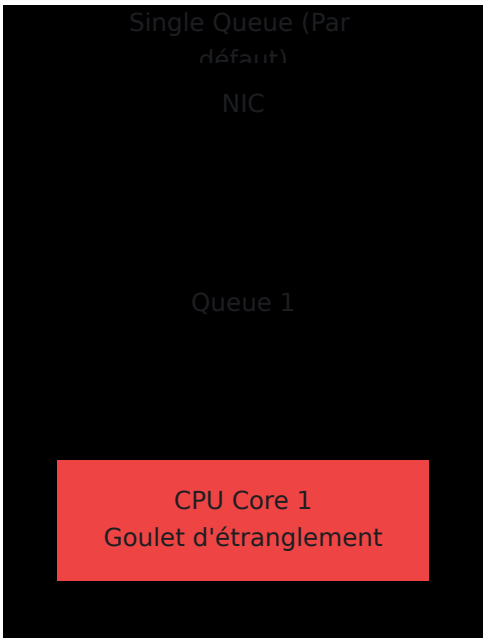
Proxmox VE utilise des dispositifs réseau **VirtIO** pour les VM, qui supportent XDP natif via le driver `virtio_net`. Cependant, vous devez activer le **multi-queue** pour des performances optimales.

Étape 1 : Comprendre l'exigence

Pourquoi le multi-queue est important :

- **Single queue** (par défaut) : Tout le trafic réseau traité par un seul cœur CPU → goulet d'étranglement
- **Multi-queue** : Trafic distribué sur plusieurs cœurs CPU → mise à l'échelle linéaire





Étape 2 : Activer le multi-queue dans Proxmox

Option A : Via l'interface Web de Proxmox

1. **Éteindre complètement la VM** (pas juste redémarrer)

- Sélectionnez votre VM dans l'interface web de Proxmox
- Cliquez sur **Éteindre**

2. **Modifier le dispositif réseau**
   - Allez dans l'onglet **Matériel**
   - Cliquez sur votre dispositif réseau (par exemple, `net0`)
   - Cliquez sur **Modifier**
3. **Définir le multi-queue**
   - Trouvez le champ **"Multiqueue"**
   - Définissez sur **8** (ou correspondant à votre nombre de vCPU, maximum 16)
   - Cliquez sur **OK**
4. **Démarrer la VM**
   - Cliquez sur **Démarrer**

Option B : Via la ligne de commande Proxmox

```
# SSH sur votre hôte Proxmox

# Trouver votre ID de VM
qm list

# Définir le multi-queue (remplacez XXX par votre ID de VM)
qm set XXX -net0 virtio=XX:XX:XX:XX:XX:XX,bridge=vmbr0,queues=8

# Exemple pour la VM 191 avec MAC BC:24:11:1D:BA:00
qm set 191 -net0 virtio=BC:24:11:1D:BA:00,bridge=vmbr0,queues=8

# Éteindre la VM
qm shutdown XXX

# Attendre l'arrêt, puis démarrer
qm start XXX
```

Recommandations sur le nombre de files d'attente :

- **4 files d'attente** : Minimum pour la production (bon pour les VM de 2-4 vCPU)
- **8 files d'attente** : Recommandé pour la plupart des déploiements (4-8 vCPU)
- **16 files d'attente** : Maximum pour haute performance (8+ vCPU)

Étape 3 : Vérifier le multi-queue à l'intérieur de la VM

Après le redémarrage de la VM, SSH dans la VM et vérifiez :

```
# Vérifier la configuration des files d'attente
ethtool -l eth0

# Sortie attendue :
# Paramètres de canal pour eth0 :
# Combiné :     8        <-- Doit correspondre à votre valeur
configurée

# Compter les files d'attente réelles
ls -1d /sys/class/net/eth0/queues/rx-* | wc -l
ls -1d /sys/class/net/eth0/queues/tx-* | wc -l

# Les deux devraient montrer 8 (ou votre valeur configurée)
```

Étape 4 : Activer XDP natif dans OmniUPF

Modifier la configuration d'OmniUPF :

```
# Modifier le fichier de configuration
sudo nano /config.yaml
```

Changer le mode XDP :

```
# Avant
xdp_attach_mode: generic

# Après
xdp_attach_mode: native
```

Redémarrer OmniUPF :

```
sudo systemctl restart omniupf
```

Étape 5 : Vérifier que XDP natif est actif

Vérifiez les journaux :

```
# Voir les journaux de démarrage
journalctl -u omniupf --since "1 minute ago" | grep -i
"xdp\|attach"

# Sortie attendue :
# xdp_attach_mode:native
# XDPAttachMode:native
# Programme XDP attaché à l'interface "eth0" (index 2)
```

Vérifiez via l'API :

```
# Interroger la configuration
curl -s http://localhost:8080/api/v1/config | grep xdp_attach_mode

# Sortie attendue :
# "xdp_attach_mode": "native",
```

Problèmes courants sur Proxmox

Problème : "Échec de l'attachement du programme XDP"

Solution :

- Vérifiez que le multi-queue est activé (`ethtool -l eth0`)
- Vérifiez la version du noyau : `uname -r` (doit être ≥ 5.15)
- Assurez-vous que le driver VirtIO est chargé : `lsmod | grep virtio_net`

Problème : Seulement 1 file d'attente malgré la configuration

Solution :

- La VM doit être **complètement arrêtée** (pas redémarrée) pour les changements de files d'attente
- Utilisez `qm shutdown XXX && sleep 5 && qm start XXX`
- Vérifiez dans la configuration de Proxmox : `grep net0 /etc/pve/qemu-server/XXX.conf`

Problème : Performance ne s'améliore pas avec le mode natif

Solution :

- Vérifiez le pinning CPU (évitez la surallocation)
- Surveillez `top` - l'utilisation CPU doit se répartir sur les cœurs
- Vérifiez les statistiques XDP : `curl http://localhost:8080/api/v1/xdp_stats`

Activation de XDP natif sur d'autres hyperviseurs

VMware ESXi / vSphere

VMware utilise le driver `vmxnet3` qui supporte XDP natif.

Exigences :

- ESXi 6.7 ou version ultérieure
- Version du driver vmxnet3 1.4.16+ dans la VM
- Version matérielle de la VM 14 ou ultérieure

Activer le multi-queue :

1. **Éteindre la VM**
2. **Modifier les paramètres de la VM** :
   - Clic droit sur la VM → Modifier les paramètres
   - Adaptateur réseau → Avancé
   - Définir **Scaling côté réception** sur **Activé**
3. **Modifier le fichier .vmx** (optionnel, pour plus de files d'attente) :

```
ethernet0.pnicFeatures = "4"
ethernet0.multiqueue = "8"
```

4. **Démarrer la VM et vérifier** :

```
ethtool -l ens192  # Vérifier le nombre de files d'attente
```

Configurer OmniUPF :

```yaml
interface_name: [ens192]  # VMware utilise généralement ens192
xdp_attach_mode: native
```

KVM / libvirt (Raw)

Activer le multi-queue via virsh :

```
# Modifier la configuration de la VM
virsh edit your-vm-name
```

Ajouter à la section de l'interface réseau :

```
<interface type='network'>
  <source network='default'/>
  <model type='virtio'/>
  <driver name='vhost' queues='8'/>
</interface>
```

Redémarrez la VM et vérifiez :

```
ethtool -l eth0
```

Microsoft Hyper-V

Hyper-V utilise le driver `hv_netvsc` qui supporte XDP natif.

Exigences :

- Windows Server 2016 ou version ultérieure
- Linux Integration Services 4.3+ dans la VM
- VM de génération 2

Activer le multi-queue :

PowerShell sur l'hôte Hyper-V :

```
# Définir VMQ (Virtual Machine Queue) - multi-queue d'Hyper-V
Set-VMNetworkAdapter -VMName "YourVM" -VrssEnabled $true -
VmmqEnabled $true
```

Configurer OmniUPF :

```
interface_name: [eth0]
xdp_attach_mode: native
```

VirtualBox

Avertissement : VirtualBox ne supporte **pas** XDP natif.

Raison : Les drivers réseau de VirtualBox (e1000, virtio-net) n'implémentent pas les hooks XDP.

Solution de contournement : Utilisez uniquement le mode générique :

```
xdp_attach_mode: generic  # Seule option pour VirtualBox
```

Vérification du mode XDP

Après avoir configuré XDP natif, vérifiez qu'il fonctionne correctement :

1. Vérifiez les journaux d'OmniUPF

```
# Voir les journaux récents
journalctl -u omniupf --since "5 minutes ago" | grep -i xdp

# Recherchez :
# ✓ "xdp_attach_mode:native"
# ✓ "Programme XDP attaché à l'interface"
# ✗ "Échec de l'attachement" ou "retour au générique"
```

2. Vérifiez via l'API

```
# Interroger le point de terminaison de configuration
curl -s http://localhost:8080/api/v1/config | jq .xdp_attach_mode

# Sortie attendue :
# "native"
```

3. Vérifiez les statistiques XDP

```
# Voir les statistiques de traitement XDP
curl -s http://localhost:8080/api/v1/xdp_stats | jq

# Sortie d'exemple :
{
  "xdp_aborted": 0,      # Doit être 0 (erreurs)
  "xdp_drop": 1234,      # Paquets abandonnés
  "xdp_pass": 5678,      # Passés à la pile
  "xdp_redirect": 9012,  # Paquets redirigés
  "xdp_tx": 3456         # Paquets transmis
}
```

4. Vérifiez le support du driver

```
# Vérifiez si le driver supporte XDP
ethtool -i eth0 | grep driver

# Pour Proxmox/KVM : devrait montrer "virtio_net"
# Pour VMware : devrait montrer "vmxnet3"
# Pour Hyper-V : devrait montrer "hv_netvsc"
```

5. Test de performance

Comparez le traitement des paquets avant et après :

```
# Surveillez le taux de paquets
watch -n 1 'curl -s http://localhost:8080/api/v1/packet_stats | jq
.rx_packets'

# Mode générique : ~1-2 Mpps
# Mode natif : ~5-10 Mpps (amélioration de 5-10x)
```

Dépannage des problèmes XDP

Problème : "Échec de l'attachement du programme XDP" au démarrage

Symptômes :

```
Erreur : échec de l'attachement du programme XDP à l'interface
eth0
```

Diagnostic :

1. **Vérifiez le support du driver** :

   ```
   ethtool -i eth0 | grep driver

   # Si le driver n'est pas virtio_net/vmxnet3/hv_netvsc, XDP
   natif ne fonctionnera pas
   ```

2. **Vérifiez la version du noyau** :

   ```
   uname -r

   # Doit être >= 5.15 pour un support XDP fiable
   ```

3. **Vérifiez les programmes XDP existants** :

   ```
   ip link show eth0 | grep xdp

   # Si un autre programme XDP est attaché, déchargez-le d'abord
   ip link set dev eth0 xdp off
   ```

Solution :

- Mettez à jour le noyau à 5.15+ si plus ancien
- Assurez-vous que le driver virtio_net est chargé : `modprobe virtio_net`

- Revenez au mode générique si le driver ne supporte pas XDP natif

---

Problème : Le mode natif revient au générique

Symptômes :

```
Avertissement : retour au mode XDP générique
```

Diagnostic :

Vérifiez `dmesg` pour les erreurs de driver :

```
dmesg | grep -i xdp | tail -20
```

Causes courantes :

1. **Le driver ne supporte pas XDP natif** :
   - Drivers de VirtualBox (pas de support XDP natif)
   - Drivers de NIC plus anciens
2. **Multi-queue non activé** :
   - Vérifiez : `ethtool -l eth0`
   - Devrait montrer > 1 file d'attente combinée
3. **Support XDP désactivé dans le noyau** :

```
# Vérifiez si XDP est activé dans le noyau
grep XDP /boot/config-$(uname -r)

# Devrait montrer :
# CONFIG_XDP_SOCKETS=y
# CONFIG_BPF=y
```

Solution :

- Activez le multi-queue (voir la section Proxmox)
- Mettez à jour vers un driver supporté
- Recompilez le noyau avec le support XDP si nécessaire

Problème : Performance ne s'améliorant pas avec le mode natif

Symptômes : Mode natif activé mais le taux de paquets est le même que le mode générique

Diagnostic :

1. **Vérifiez la distribution du multi-queue** :

```
# Vérifiez les statistiques par file d'attente
ethtool -S eth0 | grep rx_queue

# Le trafic doit être distribué sur plusieurs files d'attente
```

2. **Vérifiez l'utilisation CPU** :

```
# Surveillez l'utilisation CPU par cœur
mpstat -P ALL 1

# Vous devriez voir la charge répartie sur plusieurs CPU
```

3. **Vérifiez que XDP fonctionne réellement en mode natif** :

```
# Vérifiez bpftool (si disponible)
sudo bpftool net list

# Devrait montrer XDP attaché à l'interface
```

Solution :

- Augmentez le nombre de files d'attente (8-16 files d'attente)

- Activez le pinning CPU pour éviter la migration de cœur
- Vérifiez la surallocation CPU sur l'hyperviseur

Problème : Programme XDP abandonné (xdp_aborted > 0)

Symptômes :

```
curl http://localhost:8080/api/v1/xdp_stats
{
  "xdp_aborted": 1234,  # Non zéro indique des erreurs
  ...
}
```

Diagnostic :

XDP abandonné signifie que le programme eBPF a rencontré une erreur lors de l'exécution.

1. **Vérifiez les journaux du vérificateur eBPF** :

   ```
   dmesg | grep -i bpf | tail -20
   ```

2. **Vérifiez les limites de taille des cartes** :

   ```
   # Les cartes eBPF peuvent être pleines
   curl http://localhost:8080/api/v1/map_info

   # Recherchez des cartes à 100% de capacité
   ```

Solution :

- Augmentez les tailles de carte eBPF dans la configuration
- Vérifiez les paquets corrompus causant des erreurs eBPF
- Vérifiez que le support eBPF du noyau Linux est complet

Problème : Multi-queue ne fonctionne pas sur Proxmox

Symptômes : `ethtool -l eth0` montre seulement 1 file d'attente malgré la configuration

Diagnostic :

1. **Vérifiez la configuration de la VM Proxmox** :

```
# Sur l'hôte Proxmox
grep net0 /etc/pve/qemu-server/YOUR_VM_ID.conf

# Devrait montrer : queues=8
```

2. **Vérifiez que la VM a été complètement arrêtée** :

```
# Sur l'hôte Proxmox
qm status YOUR_VM_ID

# Doit montrer "status: stopped" avant de démarrer
```

Solution :

```
# Sur l'hôte Proxmox
# Forcer l'arrêt et redémarrer
qm shutdown YOUR_VM_ID
sleep 10
qm start YOUR_VM_ID

# Puis vérifiez à l'intérieur de la VM
ethtool -l eth0
```

Important : Les changements au nombre de files d'attente nécessitent un **arrêt complet de la VM**, pas juste un redémarrage depuis l'intérieur de la VM.

Problème : Permission refusée lors de l'attachement de XDP

Symptômes :

```
Erreur : permission refusée lors de l'attachement du programme XDP
```

Diagnostic :

Les opérations XDP nécessitent les capacités `CAP_NET_ADMIN` et `CAP_SYS_ADMIN`.

Solution :

1. **Exécutez OmniUPF en tant que root** (ou avec des capacités) :

   ```
   sudo systemctl restart omniupf
   ```

2. **Si vous utilisez systemd**, vérifiez que le fichier de service a les capacités :

   ```
   # /lib/systemd/system/omniupf.service
   [Service]
   CapabilityBoundingSet=CAP_NET_ADMIN CAP_SYS_ADMIN CAP_NET_RAW
   AmbientCapabilities=CAP_NET_ADMIN CAP_SYS_ADMIN CAP_NET_RAW
   ```

3. **Si vous utilisez Docker**, exécutez avec `--privileged` :

   ```
   docker run --privileged -v /sys/fs/bpf:/sys/fs/bpf ...
   ```

Résumé de l'impact sur les performances

Comparaison des performances dans le monde réel pour le traitement des paquets OmniUPF :

Scénario	Mode générique	Mode natif	Amélioration
Taux de paquets	1,5 Mpps	8,2 Mpps	**5,5x plus rapide**
Latence	95 µs	12 µs	**8x plus bas**
Utilisation CPU (1 Gbps)	85% (1 cœur)	15% (distribué)	**5x plus efficace**
Débit max	~1,2 Gbps	~10 Gbps	**8x plus élevé**

Recommandation : Utilisez toujours le **mode natif** avec **multi-queue activé** pour les déploiements en production.

Recommandations matérielles pour XDP

⚠ IMPORTANT : Avant d'acheter du matériel, consultez le support Omnitouch pour confirmer qu'il est 100% compatible avec votre configuration et vos exigences de déploiement spécifiques.

NICs connus pour XDP natif

Ces NICs sont vérifiés pour supporter le mode XDP natif avec OmniUPF :

NICs Intel (Recommandé pour Bare Metal)

Modèle	Vitesse	Driver	Support XDP	Remarques
Intel X520	10GbE	ixgbe	Natif ✓	Prouvé, largement disponible, bon rapport qualité/prix
Intel X710	10/40GbE	i40e	Natif ✓	Excellente prise en charge du multi-queue
Intel E810	100GbE	ice	Natif ✓	Dernière génération, meilleures performances
Intel i350	1GbE	igb	Natif ✓ (noyau 5.10+)	Bon pour les besoins de bande passante inférieure

NICs Mellanox/NVIDIA (Haute Performance)

Modèle	Vitesse	Driver	Support XDP	Remarques
ConnectX-4	25/50/100GbE	mlx5	Natif ✓	Haut débit, bon pour le calcul en périphérie
ConnectX-5	25/50/100GbE	mlx5	Natif ✓	Excellentes performances, accélération matérielle
ConnectX-6	50/100/200GbE	mlx5	Natif ✓	Dernière génération, meilleur pour l'ultra-haut débit
BlueField-2	100/200GbE	mlx5	Natif ✓	SmartNIC avec capacités DPU

NICs Broadcom

Modèle	Vitesse	Driver	Support XDP	Remarques
Série BCM57xxx	10/25/50GbE	bnxt_en	Natif ✓	Commun dans les serveurs Dell/HP

NICs virtuels (Déploiements VM)

Plateforme	Type de NIC	Driver	Support XDP	Multi-Queue	F
Proxmox/KVM	VirtIO	virtio_net	Natif ✓	Oui (configurable)	**M p V**
VMware ESXi	vmxnet3	vmxnet3	Natif ✓	Oui	N E
Hyper-V	NIC synthétique	hv_netvsc	Natif ✓	Oui	W S 2
AWS	ENA	ena	Natif ✓	Oui	I n
VirtualBox	N'importe quel	divers	Générique seulement	Non	N r p p

NICs avec support d'offload matériel

Véritable offload matériel XDP (eBPF s'exécute sur NIC) :

Fournisseur	Modèle	Vitesse	Remarques
Netronome	Agilio CX 10G	10GbE	Seul support d'offload XDP confirmé
Netronome	Agilio CX 25G	25GbE	Nécessite un firmware spécial
Netronome	Agilio CX 40G	40GbE	Très cher (~2 500-5 000 $)
Netronome	Agilio CX 100G	100GbE	Niveau entreprise uniquement

Remarque : Les NICs d'offload matériel sont rares, chers et nécessitent un déploiement bare metal. La plupart des déploiements devraient plutôt utiliser XDP natif.

Configurations testées

Ces configurations ont été vérifiées avec OmniUPF en production :

Option économique (1-10 Gbps)

- **NIC** : Intel X520 (10GbE double-port)
- **Mode** : XDP natif
- **Débit** : ~8-10 Gbps par instance UPF
- **Coût** : ~$100-200 (d'occasion/réhabilité)

Milieu de gamme (10-50 Gbps)

- **NIC** : Intel X710 (40GbE) ou Mellanox ConnectX-4 (25GbE)
- **Mode** : XDP natif
- **Débit** : ~25-40 Gbps par instance UPF
- **Coût** : ~$300-800

Haut de gamme (50-100+ Gbps)

- **NIC** : Mellanox ConnectX-5/6 (100GbE)

- **Mode** : XDP natif
- **Débit** : ~80-100 Gbps par instance UPF
- **Coût** : ~$1,000-2,500

Déploiements VM (Proxmox/KVM)

- **NIC** : VirtIO avec 8-16 files d'attente
- **Mode** : XDP natif
- **Débit** : ~5-10 Gbps par instance UPF
- **Coût** : Aucun coût matériel supplémentaire

Ce qu'il ne faut PAS acheter

Évitez ceci pour les déploiements OmniUPF en production :

NIC/Plateforme	Raison	Alternative
NICs Realtek	Pas de support XDP, mauvais drivers Linux	Intel i350 ou mieux
VirtualBox	Pas de support XDP natif	Migrer vers Proxmox/KVM
NICs de consommation	Support limité des files d'attente, peu fiables	NICs de niveau serveur Intel/Mellanox
NICs très anciennes (<2014)	Pas de support de driver XDP	Intel X520 ou plus récent

Liste de vérification avant achat

Avant d'acheter du matériel, vérifiez :

1. □ **Support du driver** : Vérifiez si le driver Linux supporte XDP

```
# Sur un système similaire
modinfo <driver_name> | grep -i xdp
```

2. **Version du noyau** : Assurez-vous que le noyau ≥ 5.15 pour un support XDP fiable

```
uname -r
```

3. **Multi-Queue** : Vérifiez que la NIC supporte plusieurs files d'attente (RSS/VMDq)

4. **Bande passante PCI** : Assurez-vous que le slot PCIe a suffisamment de voies

   - 10GbE : PCIe 2.0 x4 minimum
   - 40GbE : PCIe 3.0 x8 minimum
   - 100GbE : PCIe 3.0 x16 ou PCIe 4.0 x8

5. **Type de déploiement** :

   - Bare metal : NIC physique requise
   - VM : Support VirtIO ou SR-IOV nécessaire
   - Conteneur : Configuration de la NIC hôte héritée

⚠ **Ne basez pas vos achats uniquement sur ce guide - confirmez toujours d'abord avec le support Omnitouch !**

Ressources supplémentaires

- **Guide de configuration** : CONFIGURATION.md - Référence complète de configuration
- **Guide de dépannage** : TROUBLESHOOTING.md - Diagnostic complet des problèmes
- **Guide d'architecture** : ARCHITECTURE.md - Détails sur l'architecture eBPF et XDP

- **Guide de surveillance** : MONITORING.md - Surveillance des performances et statistiques

---

Référence rapide

Configuration XDP natif sur Proxmox (TL;DR)

```
# Sur l'hôte Proxmox :
qm set <VM_ID> -net0 virtio=<MAC>,bridge=vmbr0,queues=8
qm shutdown <VM_ID> && sleep 10 && qm start <VM_ID>

# À l'intérieur de la VM :
ethtool -l eth0  # Vérifiez 8 files d'attente
sudo nano /etc/omniupf/config.yaml  # Définir : xdp_attach_mode:
native
sudo systemctl restart omniupf
journalctl -u omniupf --since "1 min ago" | grep xdp  # Vérifiez
le mode natif
```

Vérifiez que le mode XDP est actif

```
# Vérifiez la configuration
curl -s http://localhost:8080/api/v1/config | grep xdp_attach_mode

# Vérifiez les statistiques
curl -s http://localhost:8080/api/v1/xdp_stats | jq

# Vérifiez les files d'attente
ethtool -l eth0
```

Documentation de l'API OmniUPF

Vue d'ensemble

L'API OmniUPF fournit une interface RESTful complète pour gérer et surveiller la fonction de plan utilisateur basée sur eBPF. L'API permet un contrôle et une observabilité en temps réel de tous les composants UPF.

Capacités de l'API

Gestion des sessions :

- **Sessions PFCP** : Interroger les sessions actives, voir les détails de la session, filtrer par IP UE ou TEID
- **Associations PFCP** : Surveiller les associations et l'état des nœuds du plan de contrôle

Règles de trafic :

- **Règles de détection de paquets (PDR)** : Inspecter les classificateurs de trafic montants et descendants (IPv4/IPv6)
- **Règles d'action de transfert (FAR)** : Voir les politiques de transfert, de mise en mémoire tampon et de suppression
- **Règles d'application de QoS (QER)** : Surveiller la limitation de débit et les politiques de QoS
- **Règles de rapport d'utilisation (URR)** : Suivre les compteurs de volume de données par session

Mise en mémoire tampon des paquets :

- **État du tampon** : Voir les paquets mis en mémoire tampon par FAR (`GET /buffer`, `GET /buffer/:far_id`)

- **Opérations de tampon** : Vider ou effacer les paquets mis en mémoire tampon (`POST /buffer/:far_id/flush`, `DELETE /buffer/:far_id`, `DELETE /buffer`)
- **Contrôle de la mise en mémoire tampon** : Déclenchement de notification manuelle (`POST /buffer/:far_id/notify`)
- **État de notification** : Voir l'état de notification DLDR (`GET /buffer/notifications`)

Surveillance et statistiques :

- **Statistiques de paquets** : Compteurs de paquets en temps réel par protocole (GTP, IP, TCP, UDP, ICMP, ARP)
- **Statistiques XDP** : Métriques de performance du chemin de données (passer, supprimer, rediriger, annuler)
- **Statistiques des interfaces N3/N6** : Distribution du trafic RAN et réseau de données
- **Statistiques de routage** : Performance de recherche FIB (hits de cache, recherches, erreurs)

Gestion des routes :

- **Routes UE** : Interroger la table de routage IP UE à gNB (`GET /routes`)
- **Intégration FRR** : Synchroniser les routes avec le démon Free Range Routing (`POST /routes/sync`)
- **Sessions de routage** : Voir les sessions de protocole de routage (`GET /routing/sessions`)
- **Base de données OSPF** : Interroger la base de données de routes externes OSPF (`GET /ospf/database/external`)

Configuration :

- **Configuration UPF** : Récupérer et modifier la configuration (`GET /config`, `POST /config`)
- **Configuration du plan de données** : Interroger la configuration spécifique au plan de données (`GET /dataplane_config`)
- **Capacités XDP** : Interroger le support du mode XDP et les capacités de l'interface (`GET /xdp_capabilities`)

- **Capacité de la carte eBPF** : Surveiller l'utilisation des ressources et la capacité (`GET /map_info`)

Intégration de l'interface Web

L'interface Web OmniUPF est construite sur cette API et fournit un tableau de bord interactif pour toutes les fonctionnalités de l'API. Voir le Guide de l'interface Web pour des captures d'écran et des exemples d'utilisation.

Documentation de l'API Swagger

L'API est entièrement documentée en utilisant la spécification **OpenAPI 3.0 (Swagger)**. L'interface Swagger interactive fournit :

- Documentation complète des points de terminaison avec schémas de requête/réponse
- Fonctionnalité d'essai pour tester les appels API directement depuis le navigateur
- Définitions de schéma pour tous les modèles de données
- Codes d'état HTTP et réponses d'erreur

Interface Swagger interactive montrant les points de terminaison de l'API OmniUPF avec une documentation détaillée.

Accéder à l'interface Swagger

La documentation Swagger est disponible à l'adresse :

```
http://<upf-host>:8080/swagger/index.html
```

Par exemple : `http://10.98.0.20:8080/swagger/index.html`

Chemin de base de l'API

Tous les points de terminaison de l'API sont préfixés par :

```
/api/v1
```

````
## Fonctionnalités de l'API

### Pagination

L'API OmniUPF prend en charge la pagination pour les points de
terminaison qui renvoient de grands ensembles de données. La
pagination empêche les délais d'attente et réduit l'utilisation de
la mémoire lors de la requête de milliers de sessions, PDR ou URR.

**Styles de pagination pris en charge** :

1. **Pagination basée sur les pages** (recommandée) :
   - `page` : Numéro de page (commençant à 1)
   - `page_size` : Éléments par page (par défaut : 100, max :
1000)

2. **Pagination basée sur l'offset** :
   - `offset` : Nombre d'éléments à ignorer
   - `limit` : Nombre d'éléments à renvoyer (max : 1000)

**Exemples de requêtes** :

```bash
# Basé sur les pages : Obtenir la deuxième page avec 50 éléments
par page
GET /api/v1/pfcp_sessions?page=2&page_size=50

# Basé sur l'offset : Ignorer les 100 premiers éléments, renvoyer
les 50 suivants
GET /api/v1/pfcp_sessions?offset=100&limit=50

# Comportement par défaut (sans paramètres de pagination) : Les
100 premiers éléments
GET /api/v1/pfcp_sessions
````

Format de réponse :
````

```
&#123;
  "data": [
    &#123; /* objet de session */ &#125;,
    &#123; /* objet de session */ &#125;,
    ...
  ],
  "pagination": &#123;
    "total": 5432,
    "page": 2,
    "page_size": 50,
    "total_pages": 109
  &#125;
&#125;
```

Points de terminaison paginés :

- `/api/v1/pfcp_sessions` - Liste des sessions PFCP
- `/api/v1/pfcp_associations` - Liste des associations PFCP
- `/api/v1/routes` - Routes IP UE
- `/api/v1/uplink_pdr_map` - PDRs montants (informations de base)
- `/api/v1/uplink_pdr_map/full` - PDRs montants avec détails complets du filtre SDF
- `/api/v1/downlink_pdr_map` - PDRs descendants IPv4 (informations de base)
- `/api/v1/downlink_pdr_map/full` - PDRs descendants IPv4 avec détails complets du filtre SDF
- `/api/v1/downlink_pdr_map_ip6` - PDRs descendants IPv6 (informations de base)
- `/api/v1/downlink_pdr_map_ip6/full` - PDRs descendants IPv6 avec détails complets du filtre SDF
- `/api/v1/far_map` - Règles d'action de transfert
- `/api/v1/qer_map` - Règles d'application de QoS
- `/api/v1/urr_map` - Règles de rapport d'utilisation

Points de terminaison de gestion des tampons :

- `GET /api/v1/buffer` - Lister tous les tampons FAR avec des statistiques

- `GET /api/v1/buffer/:far_id` - Obtenir l'état du tampon pour un FAR spécifique
- `GET /api/v1/buffer/notifications` - Lister l'état de notification DLDR
- `DELETE /api/v1/buffer` - Effacer tous les paquets mis en mémoire tampon
- `DELETE /api/v1/buffer/:far_id` - Effacer le tampon pour un FAR spécifique
- `POST /api/v1/buffer/:far_id/flush` - Vider (rejouer) les paquets mis en mémoire tampon
- `POST /api/v1/buffer/:far_id/notify` - Envoyer manuellement une notification DLDR

Points de terminaison de configuration :

- `GET /api/v1/config` - Obtenir la configuration UPF actuelle
- `POST /api/v1/config` - Mettre à jour la configuration UPF (champs modifiables à l'exécution)
- `GET /api/v1/dataplane_config` - Obtenir la configuration spécifique au plan de données

Points de terminaison d'intégration de routage :

- `GET /api/v1/routes` - Lister les routes UE
- `POST /api/v1/routes/sync` - Déclencher la synchronisation des routes avec FRR
- `GET /api/v1/routing/sessions` - Obtenir les sessions de protocole de routage
- `GET /api/v1/ospf/database/external` - Obtenir la base de données LSA externe OSPF

Meilleures pratiques :

- Utiliser `page_size=100` pour l'affichage de l'interface Web
- Utiliser `page_size=1000` pour les exports en masse (limite max)
- Interroger `pagination.total_pages` pour déterminer le nombre d'itérations
- Augmenter `page_size` pour de meilleures performances API (moins de requêtes)

Support CORS

Le partage de ressources entre origines (CORS) est activé par défaut pour tous les points de terminaison de l'API, permettant à l'interface Web et aux applications tierces de consommer l'API depuis différentes origines.

Métriques Prometheus

En plus de l'API REST, OmniUPF expose des métriques Prometheus sur le point de terminaison `/metrics` (port par défaut `:9090`).

Les métriques fournissent :

- Compteurs de messages PFCP et latence par pair
- Statistiques de paquets par type de protocole
- Verdicts d'action XDP
- Statistiques de tampon
- Utilisation de la capacité de la carte eBPF
- Suivi du volume URR

Voir la Référence des métriques pour la documentation complète.

Documentation connexe

- **Guide de l'interface Web** - Tableau de bord interactif construit sur cette API
- **Référence des métriques** - Documentation des métriques Prometheus
- **Codes de cause PFCP** - Codes d'erreur PFCP et dépannage
- **Guide de gestion des règles** - Configuration PDR, FAR, QER, URR
- **Guide de gestion des routes** - Intégration FRR et routage UE
- **Guide de surveillance** - Surveillance des statistiques et planification de capacité
- **Guide de configuration** - Options de configuration UPF
- **Swagger UI** - Documentation API interactive (remplacer `localhost` par votre hôte UPF)

Gestion des Routes UE

> **Documentation Connexe**:
>
> - Documentation API - Référence complète de l'API incluant les points de terminaison de gestion des routes
> - Guide des Opérations - Opérations et surveillance de l'interface Web

Aperçu

Le UPF (User Plane Function) s'intègre avec **FRR (Free Range Routing)** pour gérer dynamiquement les routes IP des Équipements Utilisateurs (UE). Cette intégration garantit qu'à mesure que les sessions UE sont établies ou terminées, l'infrastructure de routage s'adapte automatiquement pour refléter la topologie réseau actuelle.

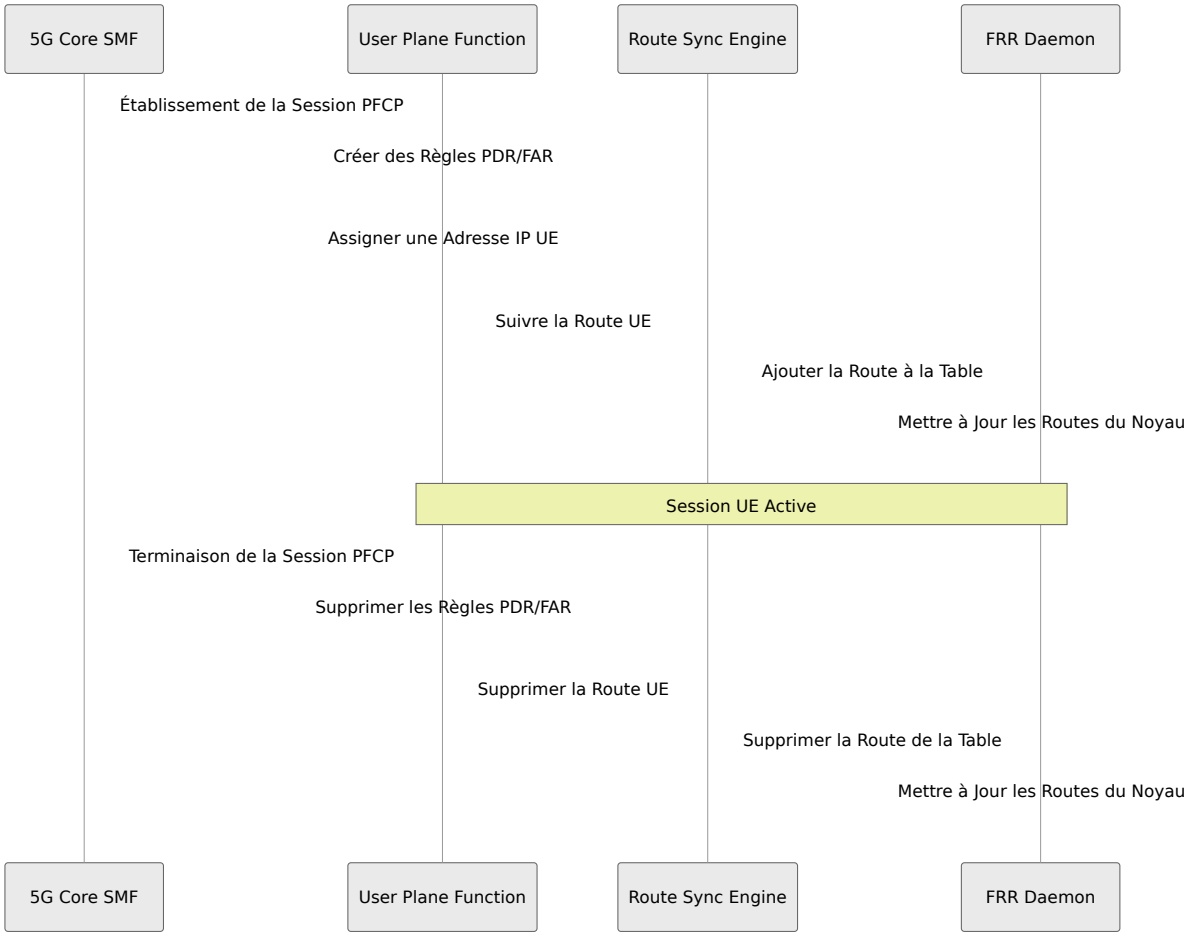
Qu'est-ce que FRR ?

FRR (Free Range Routing) est une suite de protocoles de routage robuste et open-source pour les plateformes Linux et Unix. Elle implémente divers protocoles de routage, y compris BGP, OSPF, RIP, et d'autres. Dans notre déploiement, FRR agit comme le démon de routage qui maintient la table de routage du noyau et peut redistribuer des routes vers d'autres éléments du réseau.

Architecture

Comment Fonctionne la Synchronisation des Routes

Cycle de Vie des Routes



Synchronisation Automatique

Le UPF maintient un registre interne de toutes les adresses IP UE actives. Lorsque activé, le système de synchronisation des routes :

1. **Surveille les Sessions UE**: Suit toutes les sessions PFCP actives et leurs adresses IP UE associées
2. **Maintient la Liste des Routes**: Garde une liste à jour des routes qui doivent être dans la table de routage
3. **Synchronise avec FRR**: Pousse automatiquement les mises à jour de routes vers le démon FRR via son API

4. **Gère les Échecs**: Suit l'état de synchronisation (synchronisé/échec) pour chaque route et réessaie si nécessaire

Configuration de FRR

Configuration

FRR est déployé et configuré à l'aide de **modèles Ansible** pour établir les paramètres de routage de base. Vous définissez la configuration FRR une fois en tant que **modèle Jinja2** dans votre playbook Ansible, et Ansible la propage automatiquement à toutes vos instances UPF lors du déploiement.

Un modèle de configuration Jinja2 FRR typique inclut :

```
frr version 7.2.1
frr defaults traditional
hostname pgw02
log syslog informational
service integrated-vtysh-config
!
ip route {{ hostvars[inventory_hostname]['ansible_default_ipv4']
['gateway'] }}/32 {{ ansible_default_ipv4['interface'] }}
!
interface {{ ansible_default_ipv4['interface'] }}
 ip address ospf router-id {{hostvars[inventory_hostname]
['ansible_host']}}
 ip ospf authentication null
!
router ospf
 ospf router-id {{hostvars[inventory_hostname]['ansible_host']}}
 redistribute static
 network {{ hostvars[inventory_hostname]['ansible_default_ipv4']
['network'] }}/{{ mask_cidr }} area 0
 area 0 authentication message-digest
!
line vty
!
end
```

Modèle de Déploiement:

1. **Définir Une Fois**: Créer le modèle Jinja2 FRR dans votre rôle Ansible (par exemple, `roles/frr/templates/frr.conf.j2`)
2. **Configurer les Paramètres**: Définir des variables dans votre inventaire Ansible pour chaque hôte UPF
3. **Déployer Partout**: Exécuter le playbook Ansible pour déployer la configuration FRR à tous les nœuds UPF
4. **Personnalisation Automatique**: Ansible utilise des variables spécifiques à l'hôte (adresses IP, IDs de routeur, etc.) pour personnaliser la configuration FRR de chaque UPF

Paramètres Personnalisables dans le modèle Jinja2 :

- **Paramètres OSPF**: ID de routeur, configuration de zone, méthodes d'authentification, annonces de réseau
- **Configuration BGP**: ASN, relations de voisinage, politiques de route, communautés
- **Redistribution de Routes**: Quelles routes redistribuer (par exemple, `redistribute static` pour les routes UE)
- **Filtrage de Routes**: Cartes de routes, listes de préfixes, listes d'accès
- **Paramètres d'Interface**: Paramètres d'interface OSPF/BGP

Intégration UPF: Une fois la configuration de base FRR déployée à chaque instance UPF, le UPF ajoute dynamiquement les adresses IP UE en tant que **routes hôtes** (/32 pour IPv4, /128 pour IPv6) via l'interface vtysh de FRR en fonction des sessions PFCP actives. Ces routes sont ensuite :

1. **Ajoutées en tant que routes statiques FRR** par le moteur de synchronisation des routes UPF (via vtysh)
2. **Récupérées par FRR** via la directive `redistribute static`
3. **Annoncées aux protocoles de routage** (OSPF, BGP) selon votre configuration FRR
4. **Propagées au réseau** afin que le trafic UE puisse être routé vers cette instance UPF

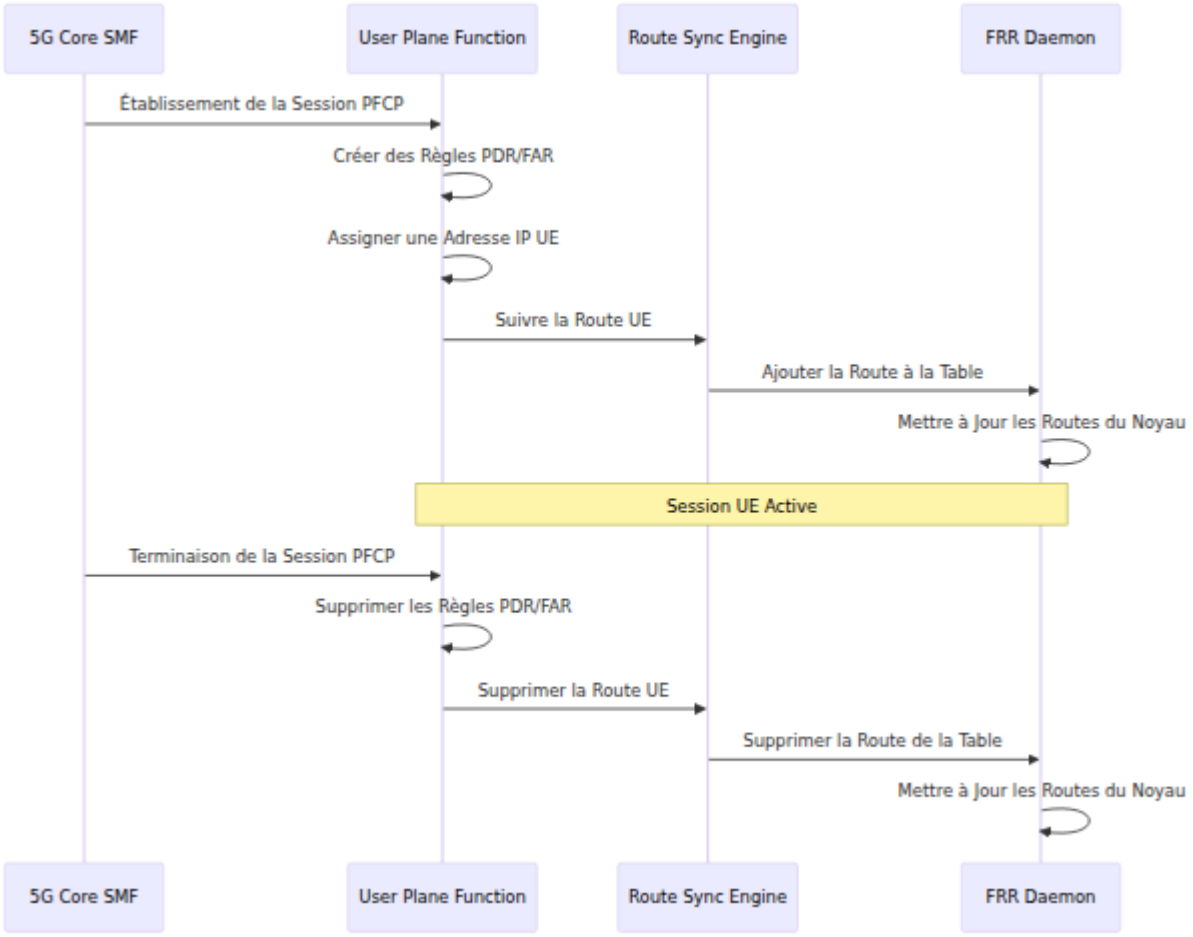
> **Important**: Le UPF ajoute des routes via l'interface vtysh de FRR, les rendant routes statiques FRR (pas des routes noyau). Vous devez utiliser

> `redistribute static` dans votre configuration OSPF/BGP, pas `redistribute kernel`.

Points Clés:

- **Définir Une Fois, Déployer Partout**: Définissez le modèle Jinja2 FRR une fois dans Ansible, et il est automatiquement déployé à toutes les instances UPF
- **Ansible gère la configuration statique**: Le modèle Jinja2 configure tous les paramètres des protocoles de routage (zones OSPF, voisins BGP, authentification, politiques de route, etc.)
- **UPF gère les routes dynamiques**: Chaque instance UPF gère dynamiquement uniquement les routes IP UE /32 en fonction de ses sessions PFCP actives
- **Annonce automatique des routes**: FRR sur chaque UPF redistribue automatiquement les routes UE locales selon vos politiques configurées
- **Gestion centralisée**: Mettez à jour le modèle Ansible et réexécutez le playbook pour modifier la configuration de routage sur tous les UPF simultanément

Annonce de Routes



Surveillance et Gestion

Intégration de l'Interface Web

Le Panneau de Contrôle UPF fournit une page **Routes** qui affiche :

- **État des Routes**: Si la synchronisation des routes est activée ou désactivée
- **Total des Routes**: Nombre d'adresses IP UE suivies
- **Statistiques de Synchronisation**: Nombre de routes synchronisées avec succès et d'échecs
- **Routes Actives**: Liste en temps réel de toutes les adresses IP UE actuellement dans la table de routage

- **Voisins OSPF**: État en direct des adjacences OSPF avec les détails des voisins
- **Pairs BGP**: État de la session BGP et statistiques de préfixe (lorsqu'elles sont configurées)
- **Routes Redistribuées OSPF**: Vue complète des LSA externes montrant comment les routes UE sont annoncées

La page Routes fournit une visibilité complète sur la synchronisation des routes UE, les voisins des protocoles de routage et les annonces de routes redistribuées.

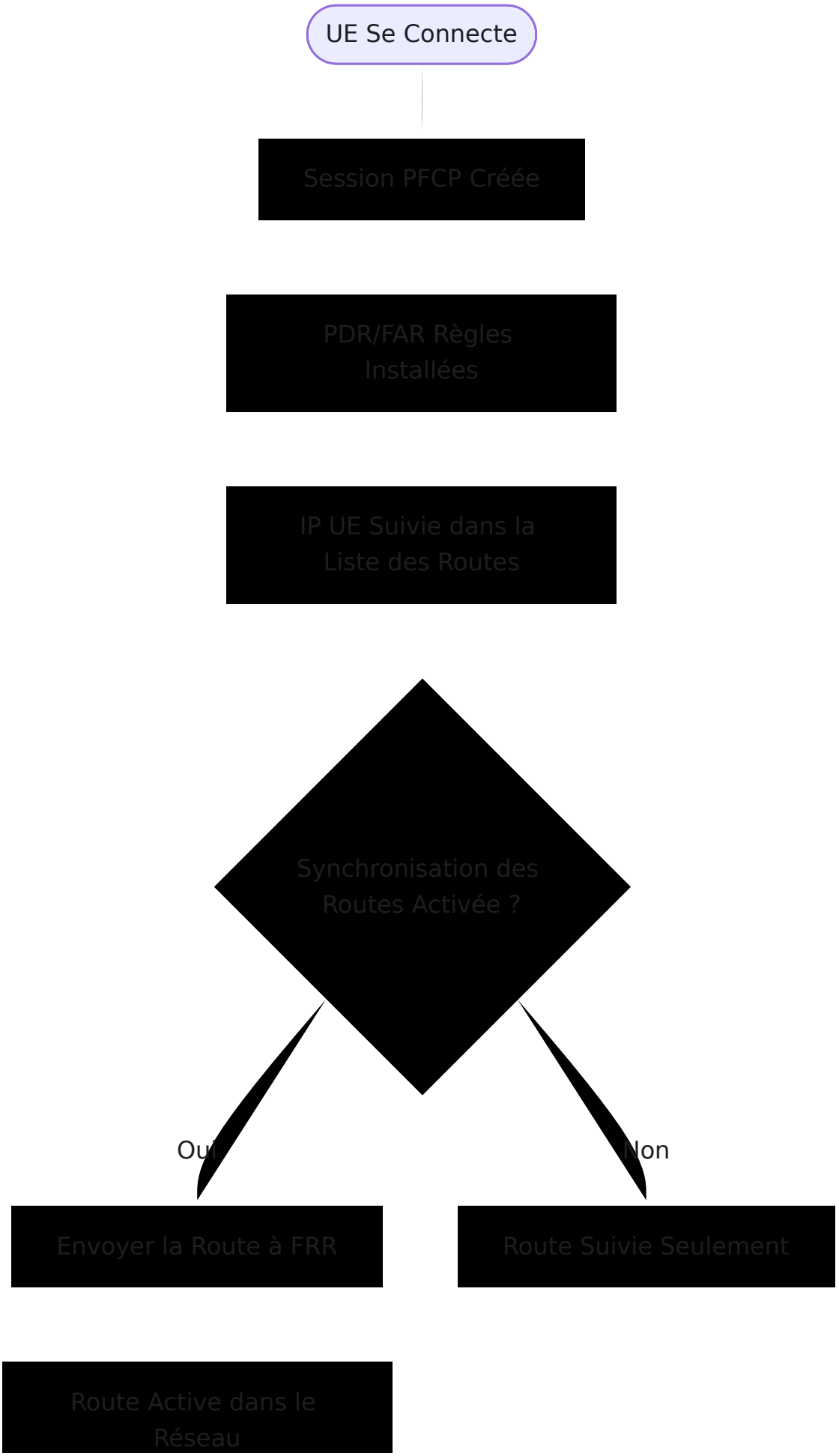
Opération de Synchronisation Manuelle

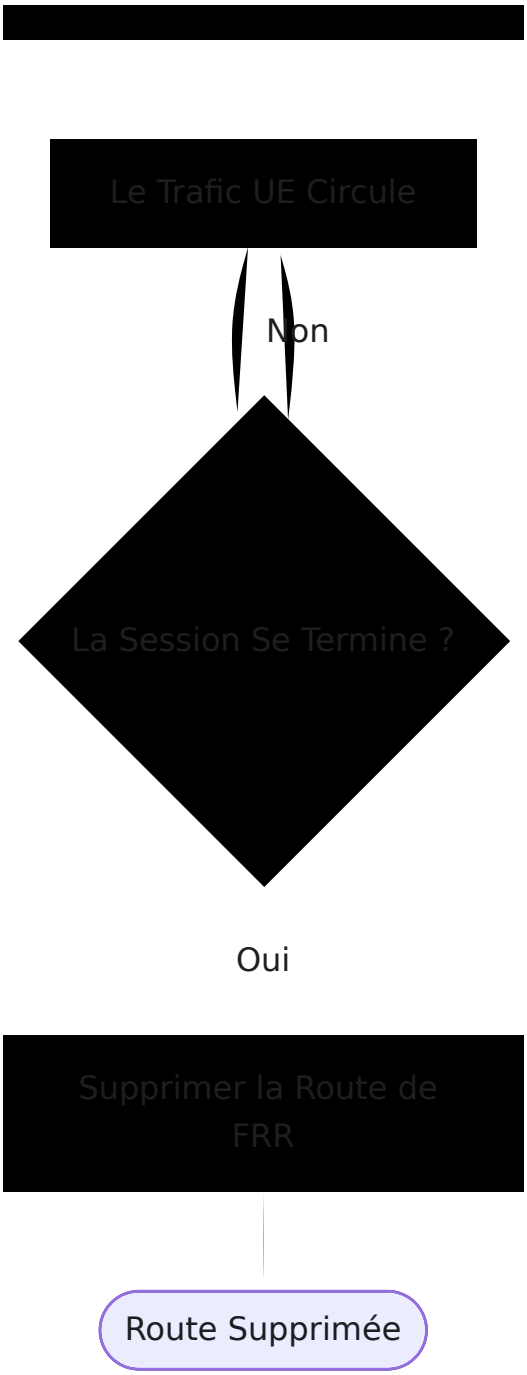
Les administrateurs peuvent déclencher une synchronisation manuelle des routes via l'interface web en utilisant le bouton **Synchroniser les Routes**. Cette opération :

1. Relit la liste actuelle des sessions UE actives depuis le UPF
2. Compare avec la table de routage de FRR

3. Ajoute toutes les routes manquantes
4. Supprime toutes les routes obsolètes
5. Retourne des statistiques de synchronisation mises à jour

Flux de Routes


UE Se Connecte
Session PFCP Créée
PDR/FAR Règles Installées
IP UE Suivie dans la Liste des Routes
Synchronisation des Routes Activée ?
Oui
Non
Envoyer la Route à FRR
Route Suivie Seulement
Route Active dans le Réseau



Avantages

- **Provisionnement Zero Touch**: Les routes sont gérées automatiquement sans intervention manuelle
- **Adaptation Dynamique**: Le routage réseau s'adapte en temps réel à la mobilité des UE et aux changements de session
- **Scalabilité**: Prend en charge des milliers de routes UE simultanées
- **Résilience**: Les opérations de synchronisation échouées sont suivies et peuvent être réessayées

- **Visibilité**: Visibilité complète de l'état des routes via l'interface web

Détails Techniques

Points de Terminaison API

Le UPF expose les points de terminaison de gestion des routes suivants :

- `GET /api/v1/routes` - Lister toutes les routes UE suivies sans synchronisation
- `POST /api/v1/routes/sync` - Synchroniser les routes avec FRR et retourner la liste mise à jour
- `GET /api/v1/route_stats` - Obtenir des statistiques de routage détaillées
- `GET /api/v1/routing/sessions` - Obtenir les sessions de protocoles de routage (voisins OSPF, pairs BGP)
- `GET /api/v1/ospf/database/external` - Obtenir la base de données OSPF AS-External LSA (routes redistribuées)

> **Voir Aussi**: Documentation API - Gestion des Routes pour des détails complets sur les points de terminaison et des exemples

Format de Route

Les routes sont stockées et gérées comme de simples adresses IP (par exemple, `100.64.18.5`). Le démon de routage gère les détails complets de l'entrée de route, y compris :

- Préfixe/masque de destination
- Passerelle/prochain saut
- Liaison d'interface
- Métrique et distance administrative

Support IPv6

Le gestionnaire de routes prend en charge à la fois les adresses UE IPv4 et IPv6 :

Type d'Adresse	Longueur de Préfixe	Exemple
IPv4	/32	`100.64.18.5/32`
IPv6	/128	`2001:db8::1/128`

Pour IPv6, assurez-vous que votre configuration FRR inclut la redistribution OSPFv3 ou BGP IPv6 appropriée :

```
router ospf6
 redistribute static
```

ou pour BGP :

```
router bgp <asn>
 address-family ipv6 unicast
  redistribute static
```

Vérification de FRR

Base de Données LSA Externe OSPF

Vous pouvez vérifier que les routes UE sont correctement redistribuées dans OSPF en examinant la Base de Données d'État de Lien OSPF de FRR. Les LSA externes (Type 5) montrent les routes qui ont été injectées dans OSPF depuis des sources externes.

Base de données OSPF de FRR montrant des LSA externes incluant la route UE 100.64.18.5/32 annoncée comme une route E2 (Type Externe 2).

Dans l'exemple ci-dessus, vous pouvez voir :

- **LSA Réseau (10.98.0.20)**: L'annonce de réseau propre du UPF
- **LSA Routeur (192.168.1.1)**: Annonce de routeur OSPF
- **LSA Externes**: Y compris la route UE `100.64.18.5` redistribuée dans OSPF avec un type de métrique E2 (Type Externe 2)

Cette vérification confirme que :

1. Le UPF suit avec succès l'adresse IP UE
2. Le moteur de synchronisation des routes a poussé la route vers FRR
3. FRR a redistribué la route dans OSPF
4. Les voisins OSPF reçoivent les annonces de route