

UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

École Supérieure Polytechnique — Département Génie Informatique
Filière : DUT / LICENCE 2 SRT | Cours : Réseaux de Transmission Haut Débit

Mise en place d'un VPN MPLS

Architecture, Configuration et Résolution de problèmes

Implémentation dans GNS3 avec Cisco IOS

Présentée par

AL HASSANE BA

Sous la direction de

Mme DIENE

Année Universitaire 2025 – 2026

1. Introduction

Ce rapport présente la mise en œuvre d'un réseau VPN MPLS (Multi Protocol Label Switching Virtual Private Network) réalisée dans le cadre du cours de Réseaux de Transmission en filière DUT/LICENCE 2 SRT à l'École Supérieure Polytechnique de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar.

MPLS est une technologie de commutation qui remplace l'analyse de l'en-tête IP à chaque saut par une commutation rapide basée sur des labels. Cela permet des performances accrues, la mise en place de VPN isolés pour les clients entrepris, et une ingénierie de trafic avancée.

L'objectif de ce projet est de configurer une topologie MPLS/VPN complète dans GNS3, intégrant deux sites clients (CE1 et CE2) interconnectés à travers un backbone opérateur (PE1, P, PE2), avec attribution d'adresses automatique via DHCP et routage dynamique OSPF.

Ce rapport intègre également la documentation détaillée des difficultés rencontrées lors de la mise en œuvre, notamment le problème de connectivité lié à la coexistence des VRF et d'OSPF, ainsi que sa résolution.

2. Cadre Théorique

► 2.1 Commutation par labels vs routage IP classique

Dans un réseau IP classique, chaque routeur analyse l'en-tête IP de chaque paquet à chaque saut pour déterminer le prochain bond. Ce mécanisme est coûteux en ressources dans les réseaux de cœur à haut débit.

MPLS appose un label (valeur 20 bits) sur le paquet dès son entrée dans le domaine. Les routeurs intermédiaires ne lisent plus l'IP, ils permutent uniquement le label — opération beaucoup plus rapide.

Les trois opérations fondamentales sur les labels sont :

- **PUSH** : ajout du label en entrée du domaine MPLS (réalisé par le PE ingress)
- **SWAP** : remplacement du label à chaque routeur de transit (réalisé par les P)
- **POP** : suppression du label en sortie du domaine (réalisé par le PE egress ou le PHP)

► 2.2 Rôles des équipements : CE, PE, P

Équipement	Rôle	Connaît les VRF ?	Participe à MP-BGP ?
CE (Customer Edge)	Routeur de frontière client. Ignore le backbone MPLS.	Non	Non
PE (Provider Edge)	Frontière opérateur/client. Gère les VRF, impose/retire les labels.	Oui	Oui
P (Provider Core)	Routeur de cœur. Permute uniquement les labels MPLS.	Non	Non

► 2.3 Notions fondamentales : FEC, LSP, LDP, Labels

- **FEC** (Forwarding Equivalence Class) : **groupe de paquets traités identiquement. En pratique, un préfixe IP = une FEC.**
- **LSP** (Label Switched Path) : **chemin unidirectionnel à travers le backbone MPLS, stable tant que la topologie ne change pas.**
- **LDP** (Label Distribution Protocol) : **protocole (TCP/646) qui distribue automatiquement les mappings FEC ↔ Label entre voisins MPLS. Nécessite qu'OSPF ait convergé.**
- **Labels MPLS** : **valeur 20 bits insérée entre l'en-tête L2 et l'en-tête IP. Contient aussi le bit S (bas de pile), EXP (QoS, 3 bits) et TTL (8 bits).**

💡 Dans un VPN MPLS, deux labels sont empilés : un label de transport (pour traverser le backbone) et un label VPN (pour identifier le VRF de destination).

3. Environnement de simulation : GNS3

► 3.1 Présentation de GNS3

GNS3 (Graphical Network Simulator 3) est un émulateur réseau open source qui fait tourner de véritables images Cisco IOS dans un environnement virtualisé. Son comportement est identique à celui des équipements physiques réels, ce qui en fait l'outil de référence pour les travaux pratiques réseau.

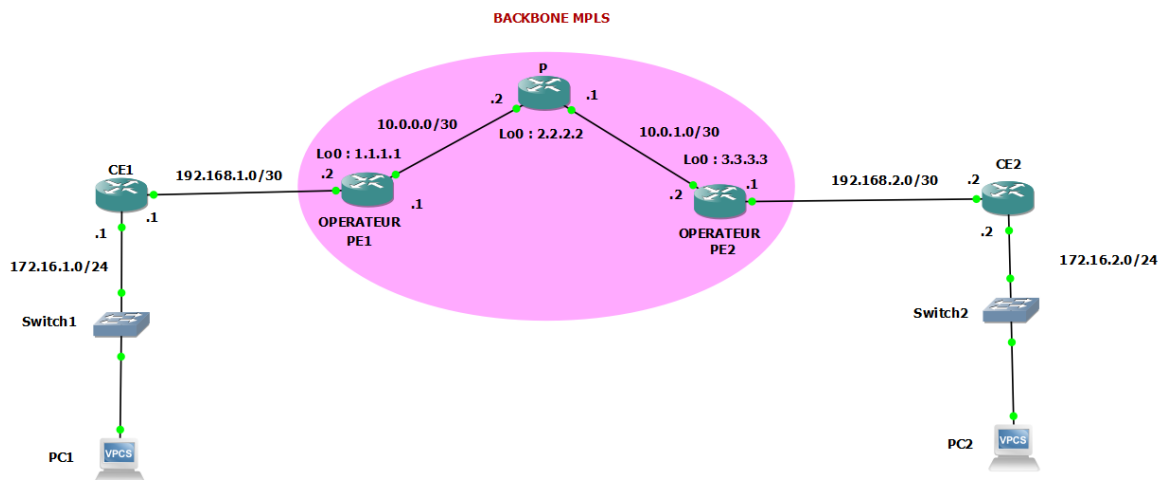
► 3.2 Configuration utilisée

Composant	Valeur
Version GNS3	2.2+
Image IOS	Cisco 7200 — c7200-adventerprisek9-mz.124-24.T5
Support protocoles	MPLS, LDP, MP-BGP, VRF, OSPF, DHCP
RAM recommandée	8 Go minimum
Capture trafic	Wireshark intégré
Nombre d'équipements	7 (CE1, PE1, P, PE2, CE2 + Switch1, Switch2)

4. Architecture de la solution

► 4.1 Schéma logique

La topologie simule un opérateur télécoms offrant un service VPN L3 MPLS à un client disposant de deux sites distants. Deux PC (PC1 et PC2) sont connectés via des switches aux routeurs CE, eux-mêmes reliés au backbone opérateur.



► 4.2 Plan d'adressage complet

Équipement	Interface	Adresse IP	Masque	Rôle / VRF
CE1	Fa0/0	192.168.1.1	/30	Lien CE1–PE1
CE1	Fa1/0	172.16.1.1	/24	LAN client 1 (DHCP)
PE1	Fa0/0 (VRF_A)	192.168.1.2	/30	Lien PE1–CE1
PE1	Fa1/0	10.0.0.1	/30	Lien PE1–P (MPLS)
PE1	Loopback0	1.1.1.1	/32	ID OSPF / BGP
P	Fa0/0	10.0.0.2	/30	Lien P–PE1 (MPLS)
P	Fa0/1	10.0.1.1	/30	Lien P–PE2 (MPLS)
P	Loopback0	2.2.2.2	/32	ID OSPF
PE2	Fa0/0	10.0.1.2	/30	Lien PE2–P (MPLS)
PE2	Fa0/1 (VRF_A)	192.168.2.1	/30	Lien PE2–CE2
PE2	Loopback0	3.3.3.3	/32	ID OSPF / BGP
CE2	Fa0/0	192.168.2.2	/30	Lien CE2–PE2
CE2	Fa1/0	172.16.2.1	/24	LAN client 2 (DHCP)
PC1	eth0	172.16.1.x	/24	Attribué par DHCP via CE1
PC2	eth0	172.16.2.x	/24	Attribué par DHCP via CE2

5. Configuration des équipements

► 5.1 CE1 — Customer Edge site 1

◆ Interfaces + DHCP Server + OSPF

```
CE1(config)#$'adresse de la gateway (pour ne pas l'attribuer C un PC)
CE1(config)#ip dhcp excluded-address 172.16.1.1
CE1(config)#
CE1(config)#! CrC)er le pool DHCP
CE1(config)#ip dhcp pool LAN_CE1
CE1(dhcp-config)#network 172.16.1.0 255.255.255.0 ! plage d'adresses
CE1(dhcp-config)#$ter 172.16.1.1 ! gateway pour les clients
CE1(dhcp-config)#dns-server 8.8.8.8 ! DNS (optionnel)
CE1(dhcp-config)#lease 1 ! bail de 1 jour
CE1(dhcp-config)#exit
CE1(config)#
CE1(config)#do wr mem
Building configuration...
[OK]
```

💡 OSPF est indispensable sur CE1 pour que PE1 apprenne dynamiquement le réseau 172.16.1.0/24 et le redistribue dans BGP VPNv4 vers PE2.

► 5.2 PE1 — Provider Edge (LER entrée)

◆ VRF + OSPF Backbone + MPLS + BGP VPNv4 + OSPF VRF

```
PE1(config)#int lo0
PE1(config-if)#
*Feb 26 22:42:16.875: %LINEPROTO-5-UPDOWN: Line protocol on Interface Loopback0, changed state to up
PE1(config-if)#ip add 1.1.1.1 255.255.255.255
PE1(config-if)#exit
PE1(config)#int f0/0
PE1(config-if)#ip add 10.0.0.1 255.255.255.252
PE1(config-if)#no sh
PE1(config-if)#
*Feb 26 22:43:44.587: %LINK-3-UPDOWN: Interface FastEthernet0/0, changed state to up
*Feb 26 22:43:45.587: %LINEPROTO-5-UPDOWN: Line protocol on Interface FastEthernet0/0, changed state to up
PE1(config-if)#mpls ip
PE1(config-if)#no sh
PE1(config-if)#exit
PE1(config)#ip vrf VRF_A
PE1(config-vrf)#rd 100:1
PE1(config-vrf)#route-target export 100:1
PE1(config-vrf)#route-target import 100:1
PE1(config-vrf)#exit
PE1(config)#
```

```
PE1(config)#int f1/0
PE1(config-if)#ip vrf forwarding VRF_A
PE1(config-if)#ip add 192.168.1.2 255.255.255.252
PE1(config-if)#no sh
PE1(config-if)#
*Feb 26 22:47:35.963: %LINK-3-UPDOWN: Interface FastEthernet1/0, changed state to up
*Feb 26 22:47:36.963: %LINEPROTO-5-UPDOWN: Line protocol on Interface FastEthernet1/0, changed state to up
PE1(config-if)#exit
PE1(config)#router ospf 1
PE1(config-router)#router-id 1.1.1.1
PE1(config-router)#network 1.1.1.1 0.0.0.0 area 0
PE1(config-router)#net 10.0.0.0 0.0.0.3 area 0
PE1(config-router)#exit
```

```
PE1(config)#mpls ldp router-id loopback0 force
PE1(config)#mpls label protocol ldp
PE1(config)#
```

```

PE1(config)#router bgp 65000
PE1(config-router)#bgp router-id 1.1.1.1
PE1(config-router)#no bgp default ipv4-unicast
PE1(config-router)#neighbor 3.3.3.3 remote as 65000
                                     ^
% Invalid input detected at '^' marker.

PE1(config-router)#neighbor 3.3.3.3 remote-as 65000
PE1(config-router)#neighbor 3.3.3.3 update-source loopback0
PE1(config-router)#address-family vpnv4
PE1(config-router-af)#neighbor 3.3.3.3 activate
PE1(config-router-af)#neighbor 3.3.3.3 send-community extended
PE1(config-router-af)#exit-add-af
                                     ^
% Invalid input detected at '^' marker.

PE1(config-router-af)#exit-add-family
                                     ^
% Invalid input detected at '^' marker.

PE1(config-router-af)#exit-address-family
PE1(config-router)#address-family ipv4 vrf VRF_A
PE1(config-router-af)#redistribute connected
PE1(config-router-af)#exit address-family
                                     ^
% Invalid input detected at '^' marker.

PE1(config-router-af)#exit-address-family
PE1(config-router)#exit
PE1(config)#end
PE1#

```

► 5.3 P — Routeur de cœur (LSR)

◆ OSPF + MPLS uniquement — pas de VRF ni BGP

```

P(config)#
P(config)#interface Loopback0
P(config-if)#ip address 2.2.2.2 255.255.255.255
P(config-if)# exit
P(config)#
P(config)#interface f0/0
P(config-if)#ip address 10.0.0.2 255.255.255.252
P(config-if)#mpls ip
P(config-if)#no shutdown
P(config-if)#exit
P(config)#
P(config)#interface f1/0
P(config-if)#ip address 10.0.1.1 255.255.255.252
P(config-if)#mpls ip
P(config-if)#no shutdown
P(config-if)#exit
P(config)#
P(config)#router ospf 1
P(config-router)#
*Feb 26 23:01:39.283: %LINEPROTO-5-UPDOWN: Line protocol on Interface Loopback0, changed state to up
router-id 2.2.2.2
P(config-router)#network 2.2.2.2 0.0.0.0 area 0
P(config-router)#network 10.0.0.0 0.0.0.3 area 0
P(config-router)#network 10.0.1.0 0.0.0.3 area 0
P(config-router)#exit
P(config)#
P(config)#mpls ldp router-id Loopback0 force
P(config)#end
P#write memory
Warning: Attempting to overwrite an NVRAM configuration previously written
by a different version of the system image.
Overwrite the previous NVRAM configuration?[confirm]
*Feb 26 23:01:41.975: %SYS-5-CONFIG_I: Configured from console by console
[confirm]
*Feb 26 23:01:42.471: %LINK-3-UPDOWN: Interface FastEthernet0/0, changed state to up
*Feb 26 23:01:43.171: %LINK-3-UPDOWN: Interface FastEthernet1/0, changed state to up

```

► 5.4 PE2 — Provider Edge (LER sortie)

◆ Symétrique à PE1

```

PE2#conf t
Enter configuration commands, one per line. End with CNTL/Z.
PE2(config)#
PE2(config)#
PE2(config)#interface lo0
PE2(config-if)#ip address 3.3.3.3 255.255.255.255
PE2(config-if)#exit
PE2(config)#
PE2(config)#interface f0/0
PE2(config-if)#ip address 10.0.1.2 255.255.255.252
PE2(config-if)#mpls ip
PE2(config-if)#no shutdown
PE2(config-if)#exit
PE2(config)#
PE2(config)#ip vrf VRF_
*Feb 26 23:09:05.899: %LINEPROTO-5-UPDOWN: Line protocol on Interface Loopback0, changed state to up
PE2(config-vrf)#rd 100:1
PE2(config-vrf)#route-target export 100:1
PE2(config-vrf)#route-target import 100:1
PE2(config-vrf)#exit
PE2(config)#
PE2(config)#interface f1/0
PE2(config-if)#ip vrf forwarding VRF_A
PE2(config-if)#ip address 192.168.2.1 255.255.255.252
PE2(config-if)#no shutdown
PE2(config-if)#exit
PE2(config)#
PE2(config)#router ospf 1
PE2(config-router)#router-id 3.3.3.3
PE2(config-router)#network 3.3.3.3 0.0.0.0 area 0
PE2(config-router)#network 10.0.1.0 0.0.0.3 area 0
PE2(config-router)#exit
PE2(config)#
*Feb 26 23:09:09.495: %LINK-3-UPDOWN: Interface FastEthernet0/0, changed state to up
*Feb 26 23:09:10.495: %LINEPROTO-5-UPDOWN: Line protocol on Interface FastEthernet0/0, changed state to up
PE2(config)#
*Feb 26 23:09:10.687: %LINK-3-UPDOWN: Interface FastEthernet1/0, changed state to up
PE2(config)#
*Feb 26 23:09:11.499: %OSPF-5-ADJCHG: Process 1, Nbr 2.2.2.2 on FastEthernet0/0 from LOADING to FULL, Loading Done
PE2(config)#
*Feb 26 23:09:11.687: %LINEPROTO-5-UPDOWN: Line protocol on Interface FastEthernet1/0, changed state to up
PE2(config)#

```

```

PE2(config)#
PE2(config)#mpls ldp router-id Loopback0 force
PE2(config)#mpls label protocol ldp
PE2(config)#
PE2(config)#router bgp 65000
PE2(config-router)#bgp router-id 3.3.3.3
PE2(config-router)#no bgp default ipv4-unicast
PE2(config-router)#neighbor 1.1.1.1 remote-as 65000
PE2(config-router)#neighbor 1.1.1.1 update-source Loopback0
PE2(config-router)#address-family vpnv4
PE2(config-router-af)#neighbor 1.1.1.1 activate
PE2(config-router-af)#neighbor 1.1.1.1 send-community extended
PE2(config-router-af)#exit-address-family
PE2(config-router-af)#address-family ipv4 vrf VRF_A
PE2(config-router-af)#redistribute connected
PE2(config-router-af)#exit-address-family
PE2(config-router)#exit
PE2(config)#end
PE2#write memory
Warning: Attempting to overwrite an NVRAM configuration previously written
by a different version of the system image.

```

► 5.5 CE2 — Customer Edge site 2

```

CE2#
CE2#configure terminal
Enter configuration commands, one per line. End with CNTL/Z.
CE2(config)#hostname CE2
CE2(config)#interface f0/0
CE2(config-if)#ip address 192.168.2.2 255.255.255.252
CE2(config-if)#no shutdown
CE2(config-if)#exit
CE2(config)#ip route 0.0.0.0 0.0.0.0 192.168.2.1
CE2(config)#end
CE2#write memory
Warning: Attempting to overwrite an NVRAM configuration previously written

```

► 5.6 PC1 et PC2 (VPCS) — Obtention IP via DHCP

```
PC1> dhcp
DDORA IP 172.16.1.2/24 GW 172.16.1.1

PC1> sh ip

NAME           : PC1[1]
IP/MASK        : 172.16.1.2/24
GATEWAY       : 172.16.1.1
DNS           : 8.8.8.8
DHCP SERVER   : 172.16.1.1
DHCP LEASE    : 86395, 86400/43200/75600
MAC          : 00:50:79:66:68:00
LPORT        : 10038
RHOST:PORT   : 127.0.0.1:10039
MTU          : 1500

PC1> █
```

```
PC2> dhcp
DDORA IP 172.16.2.2/24 GW 172.16.2.1

PC2> sh ip

NAME           : PC2[1]
IP/MASK        : 172.16.2.2/24
GATEWAY       : 172.16.2.1
DNS           : 8.8.8.8
DHCP SERVER   : 172.16.2.1
DHCP LEASE    : 86397, 86400/43200/75600
MAC          : 00:50:79:66:68:01
LPORT        : 10036
RHOST:PORT   : 127.0.0.1:10037
MTU          : 1500

PC2> █
```

6. Problème rencontré et résolution

► 6.1 Symptômes

Après la configuration initiale de tous les équipements, le ping entre PC1 et PC2 échouait systématiquement. Les diagnostics successifs ont mis en évidence l'absence des réseaux clients dans la table de routage de PE1.

⚠ *show ip route sur PE1 : les réseaux 192.168.1.0/30 et 172.16.1.0/24 étaient absents, malgré des interfaces up/up et des routes statiques configurées.*

```
PE1# show ip route
C    1.1.1.1/32          directly connected, Loopback0
O    2.2.2.2/32 via 10.0.0.2, FastEthernet1/0    ✓ backbone OK
O    3.3.3.3/32 via 10.0.0.2, FastEthernet1/0    ✓ backbone OK
C    10.0.0.0/30         directly connected, Fa1/0
O    10.0.1.0/30 via 10.0.0.2, FastEthernet1/0
-- 192.168.1.0 et 172.16.1.0 : ABSENTS --      X
```

► 6.2 Cause racine identifiée

L'analyse du fichier running-config de PE1 a révélé deux problèmes distincts et complémentaires :

◆ Problème 1 — Interface dans un VRF, invisible pour OSPF global

L'interface Fa0/0 de PE1 (connectée à CE1) était placée dans VRF_A avec la directive ip vrf forwarding VRF_A. Or OSPF process 1 opère dans la table de routage globale et ne peut pas voir les interfaces appartenant à un VRF. Les routes statiques globales pointant vers 192.168.1.1 ne pouvaient donc pas s'installer, le next-hop étant dans un espace de routage différent.

```
! Extrait running-config PE1 — cause du problème
interface FastEthernet0/0
 ip vrf forwarding VRF_A    <-- dans le VRF, invisible pour OSPF global
```

```
ip address 192.168.1.2 255.255.255.252

router ospf 1
network 192.168.1.0 0.0.0.3 area 0 <-- inutile : Fa0/0 est dans VRF !
```

◆ **Problème 2 — OSPF absent sur CE1 et CE2**

Les routeurs CE1 et CE2 n'avaient pas OSPF configuré dans leur version initiale. PE1 et PE2 ne pouvaient donc pas apprendre dynamiquement les réseaux LAN clients (172.16.1.0/24 et 172.16.2.0/24) et les redistribuer dans BGP VPNv4.

► **6.3 Solution appliquée**

La solution repose sur deux actions complémentaires : créer un processus OSPF dédié au VRF sur chaque PE, et activer OSPF sur les CE.

◆ **Action 1 — OSPF process 2 dans le VRF sur PE1 et PE2**

```
! Sur PE1 : OSPF dédié au VRF_A
PE1(config)# router ospf 2 vrf VRF_A
PE1(config-router)# router-id 1.1.1.1
PE1(config-router)# network 192.168.1.0 0.0.0.3 area 0
PE1(config-router)# redistribute bgp 65000 subnets
PE1(config-router)# exit

PE1(config)# router bgp 65000
PE1(config-router)# address-family ipv4 vrf VRF_A
PE1(config-router-af)# redistribute ospf 2 ! redistribuer OSPF VRF dans BGP
PE1(config-router-af)# exit-address-family

! Même chose sur PE2 (avec router-id 3.3.3.3 et network 192.168.2.0)
```

◆ **Action 2 — Activation OSPF sur CE1 et CE2**

```
CE1(config)# router ospf 1
CE1(config-router)# network 192.168.1.0 0.0.0.3 area 0
CE1(config-router)# network 172.16.1.0 0.0.0.255 area 0

CE2(config)# router ospf 1
CE2(config-router)# network 192.168.2.0 0.0.0.3 area 0
CE2(config-router)# network 172.16.2.0 0.0.0.255 area 0
```

► **6.4 Leçon retenue**

Erreur commise	Bonne pratique
Utiliser OSPF global pour une interface dans un VRF	Créer un processus OSPF dédié par VRF : router ospf 2 vrf VRF_A
Ne pas activer OSPF sur les CE	Activer OSPF sur CE1/CE2 pour que les PE apprennent les LAN clients
Configurer des routes statiques globales vers un next-hop VRF	Utiliser la redistribution OSPF ↔ BGP dans le contexte VRF

💡 **Règle fondamentale :** dans une architecture MPLS/VPN, tout ce qui concerne le client (interfaces, routage, redistribution) doit être traité dans le contexte du VRF correspondant. La table de routage globale et les VRF sont des espaces totalement étanches.

7. Vérifications et résultats

► 7.1 Commandes de vérification

Commande	Routeur	Ce qu'on vérifie
show ip route vrf VRF_A	PE1 / PE2	Routes clients apprises via OSPF VRF et BGP
show ip ospf neighbor	PE1, PE2	Adjacence OSPF avec les CE (process 2)
show mpls forwarding-table	PE1, P, PE2	Labels entrants/sortants et interfaces
show mpls ldp neighbor	PE1, P, PE2	Sessions LDP établies entre voisins
show ip bgp vpnv4 all	PE1 / PE2	Routes VPNv4 échangées entre les deux PE
show ip dhcp binding	CE1 / CE2	Baux DHCP attribués aux PC
ping vrf VRF_A 192.168.2.2	PE1	Connectivité end-to-end dans le VRF

► 7.2 Résultats obtenus

◆ Table de routage VRF sur PE1 après correction

```

PE1#sh ip route vrf VRF_A

Routing Table: VRF_A
Codes: L - local, C - connected, S - static, R - RIP, M - mobile, B - BGP
       D - EIGRP, EX - EIGRP external, O - OSPF, IA - OSPF inter area
       N1 - OSPF NSSA external type 1, N2 - OSPF NSSA external type 2
       E1 - OSPF external type 1, E2 - OSPF external type 2
       i - IS-IS, su - IS-IS summary, L1 - IS-IS level-1, L2 - IS-IS level-2
       ia - IS-IS inter area, * - candidate default, U - per-user static route
       o - ODR, P - periodic downloaded static route, H - NHRP, l - LISP
       + - replicated route, % - next hop override

Gateway of last resort is not set

    192.168.1.0/24 is variably subnetted, 2 subnets, 2 masks
C       192.168.1.0/30 is directly connected, FastEthernet1/0
L       192.168.1.2/32 is directly connected, FastEthernet1/0
    192.168.2.0/30 is subnetted, 1 subnets
B       192.168.2.0 [200/0] via 3.3.3.3, 00:07:08
PE1#
    
```

◆ Table MPLS Forwarding

```

PE1#show mpls forwarding-table
Local      Outgoing  Prefix          Bytes Label  Outgoing  Next Hop
Label      Label     or Tunnel Id    Switched     interface
16         No Label  192.168.1.0/30[V]  \
           \              0              aggregate/VRF_A
17         Pop Label  2.2.2.2/32      0              Fa0/0      10.0.0.2
18         Pop Label  10.0.1.0/30     0              Fa0/0      10.0.0.2
19         17        3.3.3.3/32      0              Fa0/0      10.0.0.2
PE1#
    
```

```
PE2#sh mpls forwarding-table
Local      Outgoing  Prefix          Bytes Label  Outgoing  Next Hop
Label      Label     or Tunnel Id   Switched     interface
16         16        1.1.1.1/32     0            Fa0/0     10.0.1.1
17         Pop Label 2.2.2.2/32     0            Fa0/0     10.0.1.1
18         Pop Label 10.0.0.0/30    0            Fa0/0     10.0.1.1
19         No Label  192.168.2.0/30[V] \
                                                0            aggregate/VRF_A
PE2#
```

```
P#
P#show mpls forwarding-table
Local      Outgoing  Prefix          Bytes Label  Outgoing  Next Hop
Label      Label     or Tunnel Id   Switched     interface
16         Pop Label 1.1.1.1/32     1625         Fa0/0     10.0.0.1
17         Pop Label 3.3.3.3/32     2457         Fa1/0     10.0.1.2
P#
P#
```

◆ Test de connectivité end-to-end PC1 → PC2

```
PC1> ping 172.16.2.2
84 bytes from 172.16.2.2 icmp_seq=1 ttl=59 time=152.738 ms
84 bytes from 172.16.2.2 icmp_seq=2 ttl=59 time=153.517 ms
84 bytes from 172.16.2.2 icmp_seq=3 ttl=59 time=153.742 ms
84 bytes from 172.16.2.2 icmp_seq=4 ttl=59 time=152.029 ms
84 bytes from 172.16.2.2 icmp_seq=5 ttl=59 time=155.850 ms
```

```
PC2> ping 172.16.1.2
84 bytes from 172.16.1.2 icmp_seq=1 ttl=59 time=156.101 ms
84 bytes from 172.16.1.2 icmp_seq=2 ttl=59 time=151.808 ms
84 bytes from 172.16.1.2 icmp_seq=3 ttl=59 time=152.427 ms
84 bytes from 172.16.1.2 icmp_seq=4 ttl=59 time=151.804 ms
84 bytes from 172.16.1.2 icmp_seq=5 ttl=59 time=151.393 ms

PC2> █
```

◆ Vérification BGP

```

PE1#show ip bgp vpnv4 all
BGP table version is 4, local router ID is 1.1.1.1
Status codes: s suppressed, d damped, h history, * valid, > best, i - internal,
               r RIB-failure, S Stale, m multipath, b backup-path, f RT-Filter,
               x best-external, a additional-path, c RIB-compressed,
Origin codes: i - IGP, e - EGP, ? - incomplete
RPKI validation codes: V valid, I invalid, N Not found

      Network          Next Hop          Metric LocPrf Weight Path
Route Distinguisher: 100:1 (default for vrf VRF_A)
*> 192.168.1.0/30  0.0.0.0              0          32768 ?
*>i 192.168.2.0/30  3.3.3.3              0    100          0 ?
PE1#

```

```

PE2#show ip bgp vpnv4 all
BGP table version is 4, local router ID is 3.3.3.3
Status codes: s suppressed, d damped, h history, * valid, > best, i - internal,
               r RIB-failure, S Stale, m multipath, b backup-path, f RT-Filter,
               x best-external, a additional-path, c RIB-compressed,
Origin codes: i - IGP, e - EGP, ? - incomplete
RPKI validation codes: V valid, I invalid, N Not found

      Network          Next Hop          Metric LocPrf Weight Path
Route Distinguisher: 100:1 (default for vrf VRF_A)
*>i 192.168.1.0/30  1.1.1.1              0    100          0 ?
*> 192.168.2.0/30  0.0.0.0              0          32768 ?
PE2#

```

◆ Ping et Traceroute sur le core MPLS

```

PE1#
PE1#ping vrf VRF_A 192.168.2.2
Type escape sequence to abort.
Sending 5, 100-byte ICMP Echos to 192.168.2.2, timeout is 2 seconds:
!!!!
Success rate is 100 percent (5/5), round-trip min/avg/max = 80/96/132 ms
PE1#
PE1#
PE1#

```

```

PE1#
PE1#
PE1#traceroute vrf VRF_A 192.168.2.2
Type escape sequence to abort.
Tracing the route to 192.168.2.2
VRF info: (vrf in name/id, vrf out name/id)
 1 10.0.0.2 [MPLS: Labels 17/19 Exp 0] 108 msec 72 msec 64 msec
 2 192.168.2.1 52 msec 52 msec 56 msec
 3 192.168.2.2 88 msec 84 msec 96 msec
PE1#
PE1#
PE1#

```

8. Conclusion et perspectives

► 8.1 Bilan

Ce projet a permis de mettre en œuvre une solution MPLS/VPN complète en partant d'une topologie de base jusqu'à l'intégration de clients réels (CE1, CE2, PC1, PC2) avec attribution d'adresses automatique via DHCP. Le réseau final permet une communication transparente et isolée entre les deux sites clients à travers le backbone opérateur.

Les points clés maîtrisés sont la double labellisation des paquets VPN (label transport + label VPN), le rôle de MP-BGP dans la propagation des routes VRF entre PE, la séparation stricte entre table de routage globale et tables VRF, et l'importance d'OSPF dans la convergence LDP.

► 8.2 Difficultés rencontrées

- Synchronisation OSPF / LDP / BGP : **les sessions LDP ne s'établissent pas si OSPF n'a pas convergé.**
- Interfaces dans un VRF : **affecter une interface à un VRF supprime son adresse IP, qui doit être reconfigurée immédiatement après.**
- OSPF VRF vs OSPF global : **nécessité de créer un process OSPF distinct par VRF pour parler avec les CE — point le plus délicat du projet.**
- Route Target : **la compréhension du mécanisme import/export a demandé un effort d'abstraction important.**

► 8.3 Perspectives

- QoS MPLS : **utiliser le champ EXP des labels pour différencier voix, vidéo et données.**
- MPLS-TE (Traffic Engineering) : **établir des tunnels LSP explicites via RSVP-TE pour optimiser la bande passante.**
- L2VPN / VPLS : **transporter des trames Ethernet entre sites (LAN étendu).**
- Supervision : **intégrer Prometheus/Grafana ou des APIs NETCONF/YANG vers les réseaux SDN.**

Références bibliographiques

Cisco Systems — MPLS Configuration Guide, Cisco IOS Release 12.4T.

RFC 3031 — Multiprotocol Label Switching Architecture. E. Rosen et al. IETF, 2001.

RFC 4364 — BGP/MPLS IP Virtual Private Networks. E. Rosen, Y. Rekhter. IETF, 2006.

RFC 5036 — LDP Specification. L. Andersson et al. IETF, 2007.

Ivan Pepelnjak, Jim Guichard — MPLS and VPN Architectures. Cisco Press, 2003.

GNS3 Documentation — <https://docs.gns3.com/>

Cours de Réseaux de Transmission — Mme DIENE, ESP UCAD, 2025-2026.