Multi Protocol Label Switching

Du routage IP à la commutation de labels
Application à la mise en place de VPN

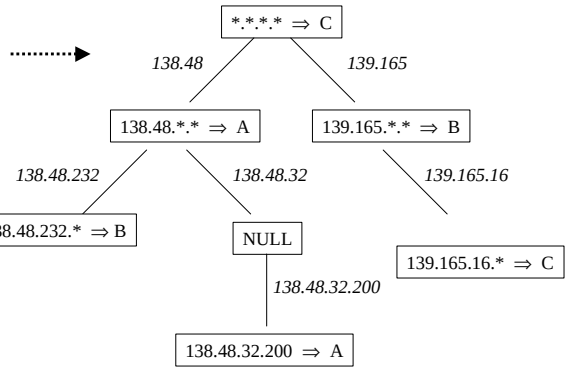
Dans les réseaux IP traditionnels

- **Routage des paquets**
  - En fonction de **l'adresse destination** dans l'entête **de niveau 3** (Network Layer)
  - En recherchant le prochain saut (next-hop) à effectuer dans **les tables de routage** des routeurs
- **Problèmes posés**
  - Le mécanisme de recherche du prochain saut dans les tables de routage est fortement consommateur de CPU
  - La taille des tables de routage des routeurs a constamment augmenté
  - **Comment trouver une méthode plus efficace pour le routage des paquets de niveau 3 ?**

Tables de routage IP

- **Représentation sous forme d'arbre**

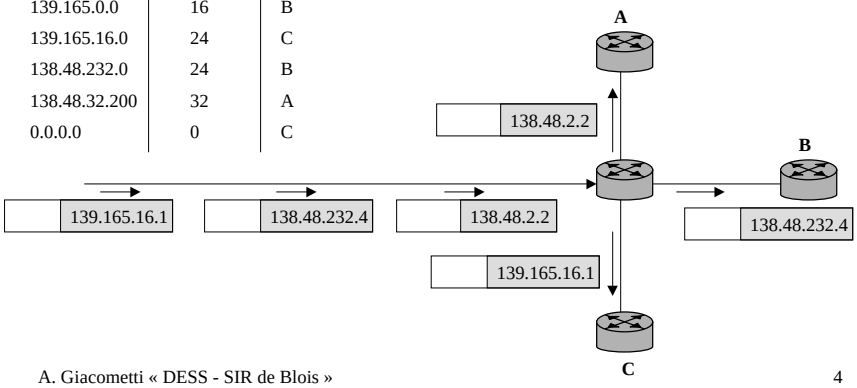
SubNet	Prefix	Next-Hop
138.48.0.0	16	A
139.165.0.0	16	B
139.165.16.0	24	C
138.48.232.0	24	B
138.48.32.200	32	A
0.0.0.0	0	C



Routage IP

- **Détermination du prochain saut**
  - ➢ En déterminant dans la table de routage le préfixe le plus long

SubNet	Prefix	Next-Hop
138.48.0.0	16	A
139.165.0.0	16	B
139.165.16.0	24	C
138.48.232.0	24	B
138.48.32.200	32	A
0.0.0.0	0	C



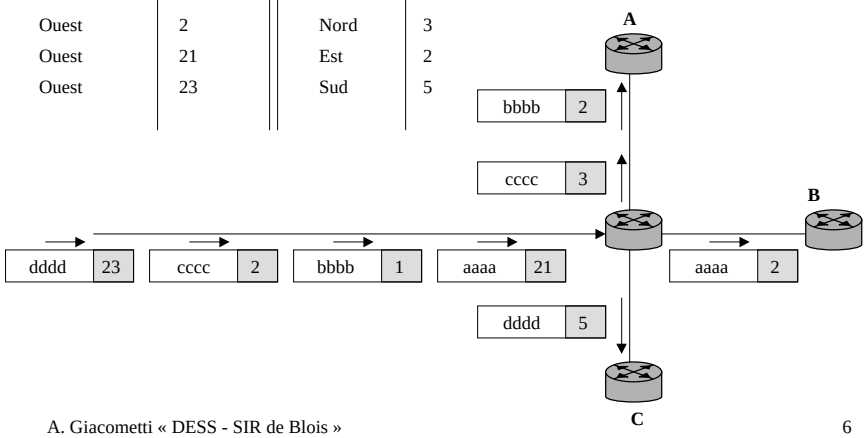
Dans les réseaux MPLS

- **Routage des paquets IP**
  - En fonction d'une information de **label** (ou tag) insérée **entre le niveau 2** (Data-Link layer) **et le niveau 3** (Network Layer)
  - En recherchant le prochain saut à effectuer dans **les tables de commutation de labels** des routeurs
- **Problèmes posés**
  - Comment attribuer un label à chaque paquet IP entrant dans un domaine MPLS ?
    - *Par classification des paquets IP dans des FEC (Forwarding Equivalence Class)*
  - Comment construire les tables de commutation de labels des routeurs ?
    - *A partir des tables de routage des routeurs*
    - *Par distribution de labels entre routeurs*

Tables de commutation

Label Forwarding Table

InPort	InLabel	OutPort	OutLabel
Ouest	1	Nord	2
Ouest	2	Nord	3
Ouest	21	Est	2
Ouest	23	Sud	5



Historique et perspectives

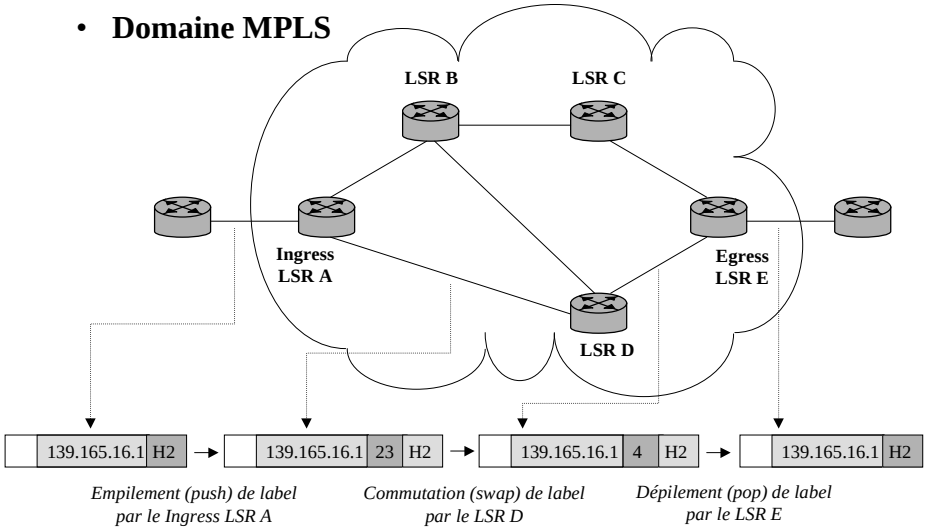
- **Origines du protocole MPLS**
  - Protocoles standards
    - *Utilisation par « X.25 », « Frame Relay », « ATM » de labels identifiants des circuits, voies ou chemins virtuels*
  - Protocoles propriétaires
    - *« Tag Switching » de Cisco, « IP Switching » de Ipsilon (nouvellement racheté par Nokia)*
  - Architecture MPLS définie par l'IETF dans la RFC 3031
- **Objectifs de MLPS**
  - Donner aux routeur une plus grande puissance de commutation
  - Offrir de nouveaux services
    - *Pour la définition de réseaux privés virtuels (en anglais, Virtual Private Network)*
    - *Pour l'ingénierie de trafic (en anglais, Traffic Engineering)*

Intégration de IP et MPLS

- **Dans quel type d'équipement ?**
  - Label Switching Router (LSR)
    - *Possède à la fois des tables de routage et des tables de commutation*
  - Trois types de LSR (relativement à un flux)
    - ***Ingress Edge LSR** (routeur d'entrée)*
      - » Reçoivent des paquets IP
      - » Classifient ces paquets dans des FEC (Forwarding Equivalence Class) à qui sont associées des étiquettes ou labels
      - » Encapsulent ces paquets dans des unités de données MPLS étiquetées
      - » Commutent en sortie les PDU MPLS construites
    - ***Interior or Traffic LSR** (routeur interne)*
      - » Reçoivent des unités de données MPLS étiquetées
      - » Commutent ces PDU MPLS en fonction de leur étiquette
    - ***Egress Edge LSR** (routeur de sortie)*
      - » Reçoivent des unités de données MPLS étiquetées
      - » Suppriment l'entête MPLS des PDU reçues
      - » Routent les paquets IP désencapsulés

Architecture MPLS

- **Domaine MPLS**

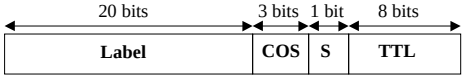


Etiquetage des paquets IP

- **Deux types de solutions**
  - En utilisant les champs « labels » de protocoles standards
    - *DLCI (Data-Link Connection Identifier) des trames Frame Relay*
    - *VCI (Virtual Chanel Identifier) des paquets X.25*
    - *VCI/VPI (Virtual Path Identifier) des cellules ATM*
  - En utilisant un entête MPLS spécifique placé entre
    - *L'entête IP de niveau 3 (Network Layer) et*
    - *Un entête de niveau 2 (Data-Link Layer)*
      - » Dans le futur, les PDU MPLS pourrait néanmoins être transmises directement au niveau physique (dans le cas de réseaux optiques)

Entête MPLS

- **Codé sur au moins 32 bits**
  - Avec un ou plusieurs labels codés sur 20 bits chacun
    - *Une PDU MPLS peut contenir une pile de labels*
    - *Le label au sommet de la pile est transmis en premier*
      - » Si S = 1, le label codé est au fond de la pile (dernier label)
      - » Si S = 0, le label codé est au-dessus d'un autre label
  - Autres champs
    - *TTL (Time To Live)*
      - » Pour éviter que des PDU MPLS puissent boucler indéfiniment dans un domaine
    - *COS (Class Of Service)*
      - » Pour pouvoir appliquer plusieurs politiques de gestion des files d'attente



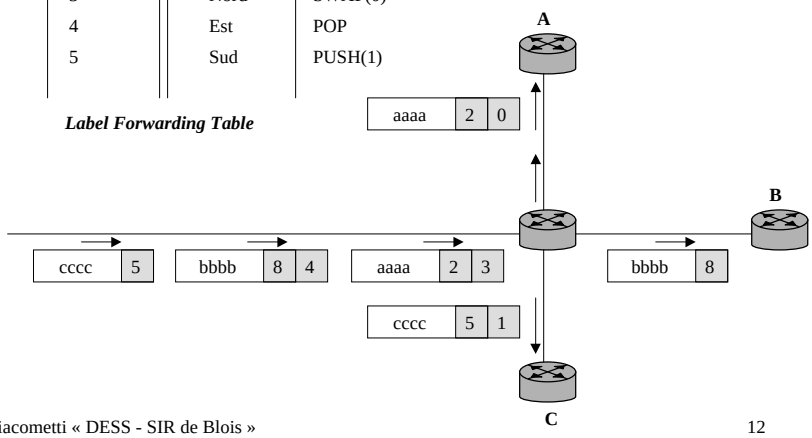
Format de l'entête MPLS

Pile de labels

- **Modifie la structure des tables de commutation**

InPort	InLabel	OutPort	Operation(s)
Ouest	3	Nord	SWAP(0)
Ouest	4	Est	POP
Ouest	5	Sud	PUSH(1)

Label Forwarding Table

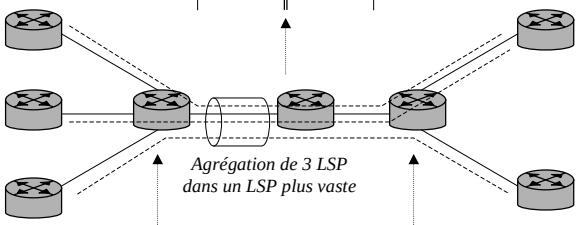


Agrégation de LSP

- **Réduction de la taille des tables de commutation**

InPort	InLabel	OutPort	Operation(s)
Ouest	0	Est	POP

Une ligne au lieu de trois



Agrégation de 3 LSP dans un LSP plus vaste

InPort	InLabel	OutPort	Operation(s)
N-O	3	Est	PUSH(0)
Ouest	4	Est	PUSH(0)
S-O	5	Est	PUSH(0)

InPort	InLabel	OutPort	Operation(s)
Ouest	3	N-E	SWAP(33)
Ouest	4	N-E	SWAP(44)
Ouest	5	S-E	SWAP(55)

Définition de FEC (1)

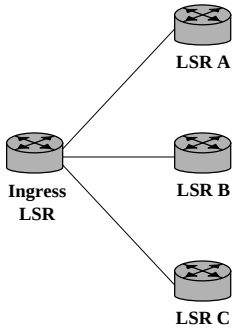
- **Identifie un ensemble de paquets IP**
  - Seront étiquetés en sortie d'un Ingress LSR par le même label
  - Suivront ainsi le même chemin ou LSP (Label Switching Path)
- **Plusieurs types de FEC**
  - En fonction de leur mode de définition
    - *Dans le cas le plus simple*
      - » Deux paquets appartiendront à une même FEC si leurs adresses IP destination appartiennent à un même sous-réseau
    - *Autres paramètres possibles*
      - » Numéro de ports source et destination TCP/UDP
      - » Qualité de service demandée

Définition de FEC (2)

- **Définition de FEC par sous-réseau**

SubNet	Prefix	Next-Hop
138.48.0.0	16	A
139.165.0.0	16	B
139.165.16.0	24	C
138.48.232.0	24	B

FEC	OutPort	OutLabel
138.48.0.0/16	N-E	3
139.165.0.0/16	Est	10
139.165.16.0/24	S-E	200
138.48.232.0/24	Est	4



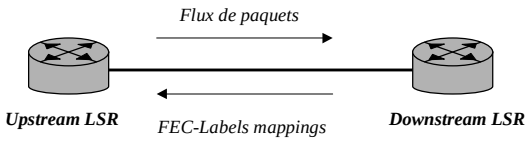
Quelle est l'origine de ces labels ?

Distribution de labels

- **Problème posé**
  - Comment coordonner les tables de commutation des LSR ?
    - *Par distribution d'associations entre FEC découvertes et labels (en anglais, FEC-Label mappings)*
- **Protocoles proposés**
  - TDP/LDP (Tag/Label Distribution Protocol)
    - *TDP est un protocole CISCO propriétaire*
    - *LDP a été défini par l'IETF dans la RFC3036*
    - *Utilisés notamment dans le cas de FEC définies par sous-réseau*
  - Extensions de RSVP (Resource Reservation Protocol)
    - *Permet d'établir des LSP en fonction de critères de ressources et de qualité de service*
  - Extensions de BGP (Border Gateway Protocol)
    - *Permet de distribuer les labels en même temps que les routes découvertes, mais aussi l'échange de routes VPN*

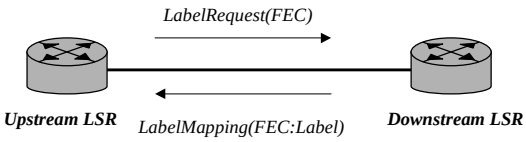
Création d'associations

- **Par quels LSR ?**
  - Dans le cas d'un flux de paquets
    - *Transmis d'un LSR amont (Upstream LSR) vers un LSR aval (Downstream LSR)*
  - Les associations FEC-Labels
    - *Sont transmises du LSR aval vers le LSR amont*



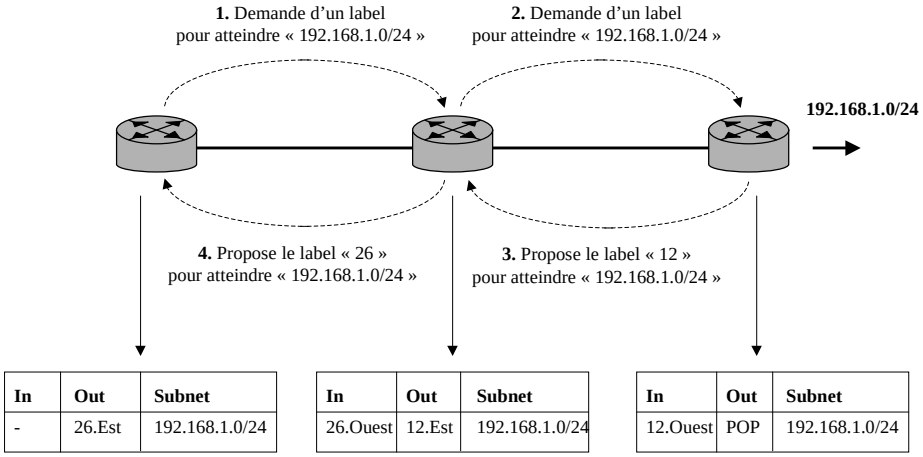
Modes de distribution (1)

- **A quels moments sont distribués les associations ?**
  - **Premier mode** : à la demande (downstream on demand label distribution)
    - *Les LSR amont font des demandes d'association par FEC*
    - *Les LSR aval allouent des labels pour les FEC demandés*



A la demande

- **Downstream on demand**



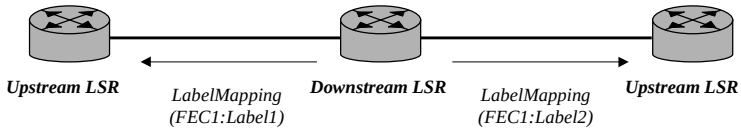
In	Out	Subnet
-	26.Est	192.168.1.0/24

In	Out	Subnet
26.Ouest	12.Est	192.168.1.0/24

In	Out	Subnet
12.Ouest	POP	192.168.1.0/24

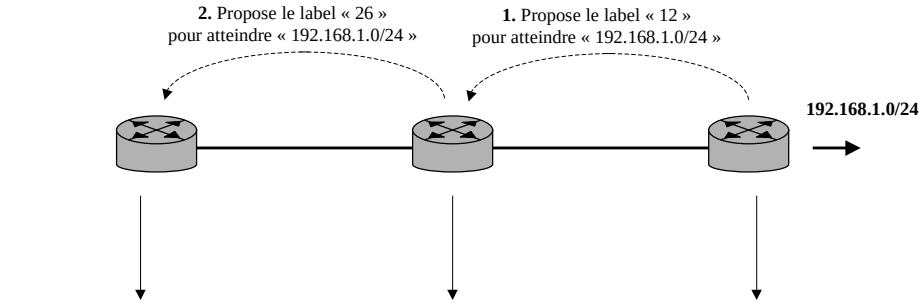
Modes de distribution (2)

- **A quels moments sont distribués les associations ?**
  - **Deuxième mode** : non sollicité (unsolicited downstream label distribution)
    - *Les LSR aval transmettent (indépendamment de toute demande) les associations FEC-label aux LSR amont*



Non Sollicité

- **Unsolicited Downstream**



In	Out	Subnet
-	26.Est	192.168.1.0/24

In	Out	Subnet
26.Ouest	12.Est	192.168.1.0/24

In	Out	Subnet
12.Ouest	POP	192.168.1.0/24

Comparaison des modes

- **A la demande**
  - Avantage
    - *Seules les associations nécessaires sont transmises*
    - *Les LSR mémorisent uniquement les associations utilisées*
  - Inconvénient
    - *Délai d'attente incompressible*
      - » En cas de défaillance d'un « saut-suivant », une nouvelle requête d'association doit être faite au nouveau « saut-suivant » sélectionné (par routage dynamique)
- **Non sollicité**
  - Avantage
    - *Un même LSR (amont) peut obtenir plusieurs associations pour un même FEC (obtenues de différents LSR aval)*
  - Inconvénient
    - *Des associations reçues peuvent ne pas être utilisées par la suite*

Modes de distribution (3)

- **Qui initie la distribution des labels pour un FEC donné ?**
  - Independent Control
    - *Chaque LSR choisit indépendamment des autres*
      - » A quel moment il distribue ses associations FEC-Label
    - *Chaque LSR assigne un label à tous les FEC qu'il découvre*
      - » Par exemple à tous les sous-réseaux qu'il découvre par routage dynamique
  - Ordered Control
    - *Les LSR frontaliers (Ingress et Egress LSR)*
      - » Initient la distribution d'associations FEC-Label pour un FEC donné
    - *Les autres LSR du domaine MPLS*
      - » Propagent seulement en amont les associations reçues

Label Distribution Protocol

- **Historique**
  - Basé sur le protocole TDP (Tag Distribution Protocol) de Cisco
  - Défini par l'IETF dans la RFC 3036
    - *TDP et LDP diffèrent principalement par le format des paquets ou messages qu'ils transmettent*
- **Fonctions principales**
  - Découverte de voisins
    - *Pour un LSR donné, déterminer si ses voisins directs sont également des LSR ou seulement des routeurs classiques*
  - Distribution de labels
    - *Intègre l'ensemble des modes de distribution décrits précédemment*
      - » Unsolicited downstream or Downstream on demand
      - » Ordered or Independent control

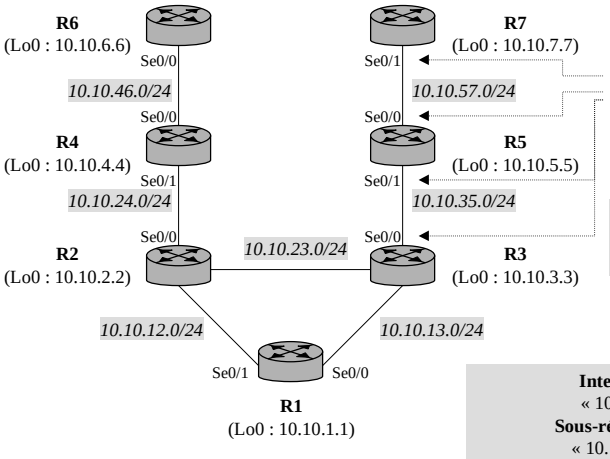
Découverte de voisins

- **Principe de base**
  - Tout LSR transmet périodiquement à ses voisins
    - *Un message LDP Hello avec comme adresse destination une adresse « multicast » réservée*
  - Tout LSR recevant un message LDP Hello
    - *Répond par un autre message LDP Hello s'il utilise lui-même LDP*
  - Etant donné deux LSR voisins utilisant LDP
    - *Le LSR avec la plus grande adresse IP*
      - » Devient actif et établit une connexion TCP sur le port 646 (711 pour TDP) pour la transmission de messages LDP
    - *Le LSR avec la plus petite adresse IP*
      - » Devient passif et attend l'établissement de la connexion TCP avec son voisin actif
    - ***Note** : des options peuvent être négociées pendant l'établissement de la connexion entre LSR voisins*
      - » Modes de distributions des labels, valeur du temporisateur « keep-alive », etc.

Messages LDP

- **Principaux types de messages**
  - Message « Hello »
    - *Utilisés pour la découverte de voisins*
  - Message « Keep-alive »
    - *Transmis périodiquement en l'absence d'autres messages (panne)*
  - Message « Label Mapping »
    - *Utilisé par un LSR pour annoncer une association FEC-Label*
  - Message « Label Withdrawal »
    - *Utilisé par un LSR pour retirer une association annoncée auparavant*
  - Message « Label Release »
    - *Utilisé par un LSR pour indiquer qu'il n'utilisera plus une association reçue précédemment*
  - Message « Label Request »
    - *Utilisé par un LSR pour demander un label pour un FEC donné*

Réseau exemple



Pour activer TDP

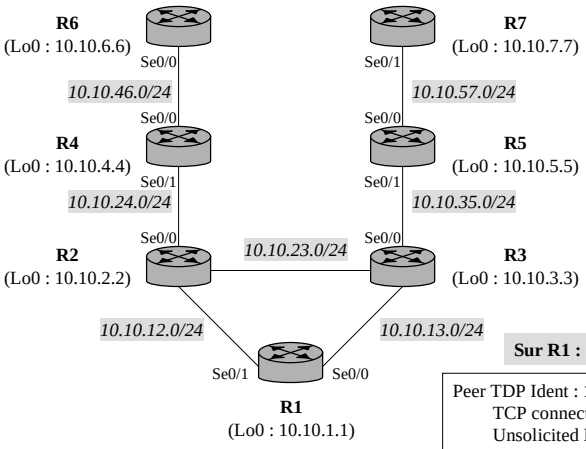
IOS : tag-switching ip
(sur tous les interfaces série de tous les routeurs)

Pour activer MPLS

IOS : ip cef
(sur tous les routeurs)
CEF = Cisco Express Forwarding

Interface Loopback0
« 10.10.x.x » pour Rx
Sous-réseau entre Rx et Ry
« 10.10.xy.0/24 » si x<y
Adresses IP pour Rx et Ry
« 10.10.xy.x » pour Rx et « 10.10.xy.y » pour Ry

Découverte de voisins



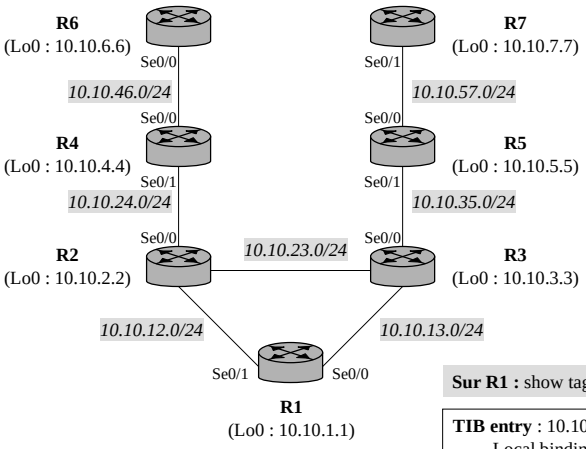
Sur R1 : show tag-Switching tdp neighbor

Peer TDP Ident : **10.10.2.2** - Local TDP Ident : **10.10.1.1**
TCP connection : 10.10.2.2.11004 - 10.10.1.1.**711**
Unsolicited Downstream
….
Peer TDP Ident : **10.10.3.3** - Local TDP Ident : **10.10.1.1**
….

Tables de commutation

- **Rôle des TIB et TFIB**
  - Tag Information Base
    - *Cette table contient toutes les associations apprises par un TSR de ses TSR voisins (TSR = Tag Switching Router)*
    - *Elle contient pour chaque FEC (sous-réseau IP) la liste des labels affectés par les TSR voisins*
  - Tag Forwarding Information Base
    - *Cette table est un sous-ensemble de la TIB*
      - » Pour chaque sous-réseau, elle contient l'entrée de la TIB correspondant au plus court chemin
      - » Le plus court chemin (déterminé par routage dynamique) est retrouvé dans la table de routage du routeur
    - *Elle est utilisée pour la commutation des paquets MPLS*
  - **Note** : dans le cas de LDP
    - *Label Information Base « LIB »*
    - *Label Forwarding Information Base « LFIB »*

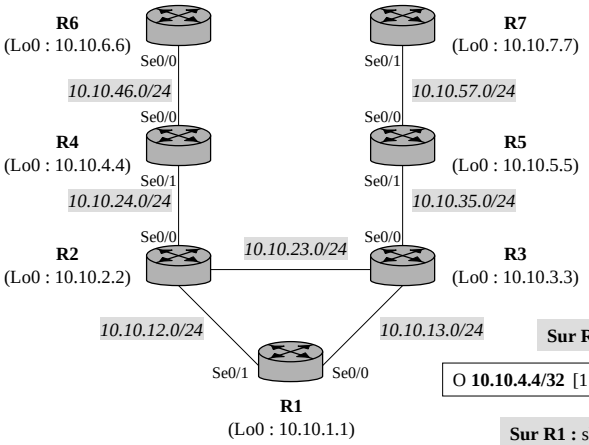
Rôle de la TIB



Sur R1 : show tag tdp bindings 10.10.4.4 255.255.255.255

TIB entry : 10.10.4.4/32
Local binding: tag: **24**
Remote binding: tsr: 10.10.3.3, tag: **20**
Remote binding: tsr: 10.10.2.2, tag: **21**

Rôle de la TFIB



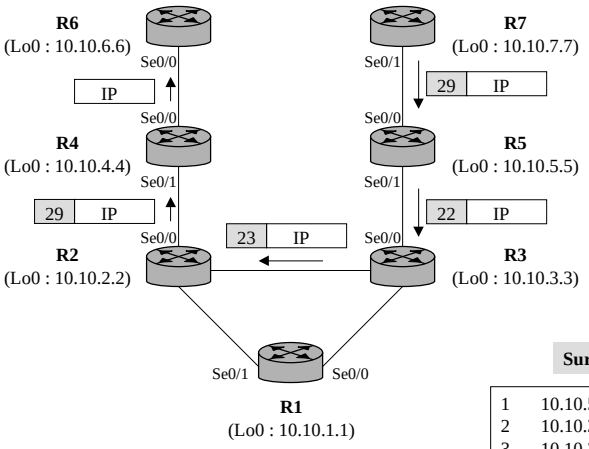
Sur R1 : show ip route 10.10.4.4

O **10.10.4.4/32** [110/1601], via 10.10.2.2, **serial0/1**

Sur R1 : show tag forwarding for 10.10.4.4

LocalLabel	**OutLabel**	**Prefix**	**OutPort**
24	21	**10.10.4.4/32**	se0/1

Label Switching Path

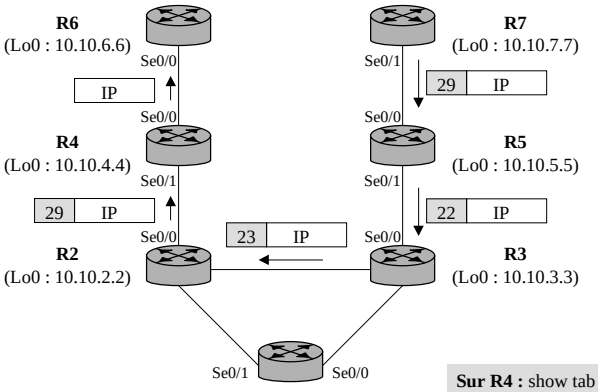


Sur R7 : traceroute 10.10.6.6

1	10.10.57.5	[MPLS: label 29]	….
2	10.10.35.3	[MPLS: label 22]	….
3	10.10.23.2	[MPLS: label 23]	….
4	10.10.24.4	[MPLS: label 29]	….
5	10.10.46.6	…. (**penultimate hop popping**)	

Permet d'éviter à R6 de consulter sa TFIB pour s'apercevoir que le réseau destination est directement accessible

Penultimate Hop Popping



Sur R4 : show tab tdp bind 10.10.6.6 255.255.255.255

TIB entry : 10.10.6.6/32
Local binding: tag: **29** (transmis à R2)
Remote binding: tsr: 10.10.6.6, tag: **imp-null**
Remote binding: tsr: 10.10.2.2, tag: 28

R6 indique ainsi qu'il est directement connecté au sous-réseau 10.10.6.6/32 (imp-null ≈ pop)

Rétention des associations

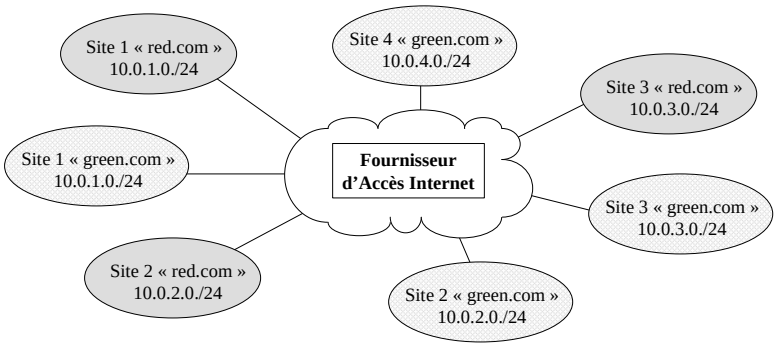
- **Mode libéral**
  - Les LSR conservent dans leur TIB/LIB toutes les associations annoncées par leur voisins
    - *Y compris celles provenant de voisins ne correspondant pas au « saut-suivant » pour le FEC en question (coûteux en mémoire)*
    - *En cas de perte de lien, permet de sélectionner rapidement un nouveau Label de sortie*
      - » Sur notre exemple, si le lien entre R1 et R2 tombe en panne, R1 peut sélectionner dans sa TIB le label 20 annoncé par R3 pour 10.10.4.4/32
- **Mode conservatif**
  - Les LSR conservent dans leur TIB/LIB uniquement les associations sélectionnées dans leur TFIB/LFIB
    - *En cas de perte de lien, nécessite d'attendre de nouvelles association pour remplacer les association défectueuses*
      - » Sur notre exemple, R1 conserverait pour le sous-réseau 10.10.4.4/32 uniquement le label 21 provenant de 10.10.2.2

Définition de VPN

- **Problème posé**
  - Comment permettre à plusieurs réseaux indépendants de cohabiter sur une même infrastructure (FAI) ?
    - *Ces réseaux doivent pouvoir utiliser le même adressage privé*
    - *Les trafics issus des différents réseaux doivent être isolés*
- **Solutions proposées**
  - Solutions classiques
    - *Utilisation de lignes spécialisées*
    - *Utilisation de tunnels IP*
    - *Utilisation de réseaux Frame Relay ou ATM*
  - Solutions alternatives
    - *Utilisation simple de MPLS*
    - *Utilisation améliorée de MPLS*

Exemple d'architecture VPN

- **Comment interconnecter dans deux VPN distincts**
  - Les réseaux des sites « red.com » et « green.com »
    - *En supposant que les deux réseaux utilisent **le même adressage privé** « 10.0.X.0/24 » pour le site X*



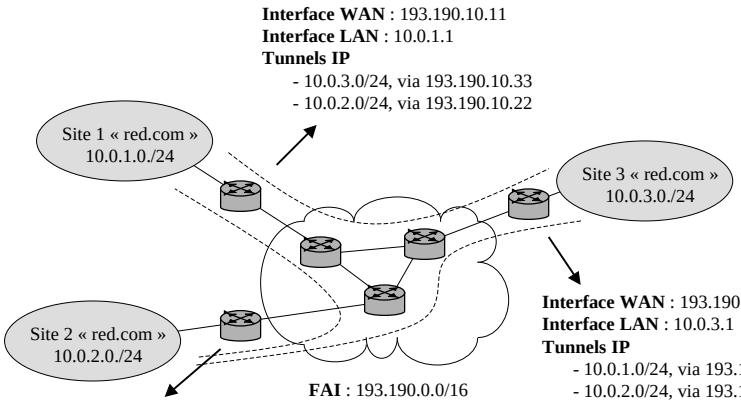
Solutions classiques (1)

- **Utilisation de Lignes Spécialisées**
  - Avantages
    - *Qualité de service a priori de très bonne qualité*
  - Inconvénients
    - *Coût pouvant être très élevé*
      - » Même en cas de trafic inter-sites faible
    - *Nombre de lignes à louer potentiellement important*
      - » N.(N-1) pour une architecture à maillage complet
    - *Solution peu évolutive*
      - » Pour chaque nouveau site, au moins une nouvelle LS doit être mise en place

Solutions classiques (2)

- **Utilisation de Tunnels IP**
  - Avantages
    - *Coût moins important*
      - » Partage plus important des ressources du backbone
    - *Solution évolutive*
      - » Nécessaire de configurer une seule connexion physique pour chaque nouveau site à connecter (même en cas de tunnels à maillage complet)
  - Inconvénients
    - *Qualité de Service non nécessairement garantie*
    - *Nombre de tunnels à configurer potentiellement important*
      - » N.(N-1) pour une architecture à maillage complet
    - *Sécurité dépendante du mécanisme de « tunneling » utilisé*
      - » Faible avec GRE (Generic Routing Encapsulation)
      - » Meilleure avec IPsec
    - *Configuration lourde*
      - » Principalement à la charge des clients

Exemple simple de tunnels IP



Interface WAN : 193.190.10.11
Interface LAN : 10.0.1.1
Tunnels IP
- 10.0.3.0/24, via 193.190.10.33
- 10.0.2.0/24, via 193.190.10.22

Interface WAN : 193.190.10.33
Interface LAN : 10.0.3.1
Tunnels IP
- 10.0.1.0/24, via 193.190.10.11
- 10.0.2.0/24, via 193.190.10.22

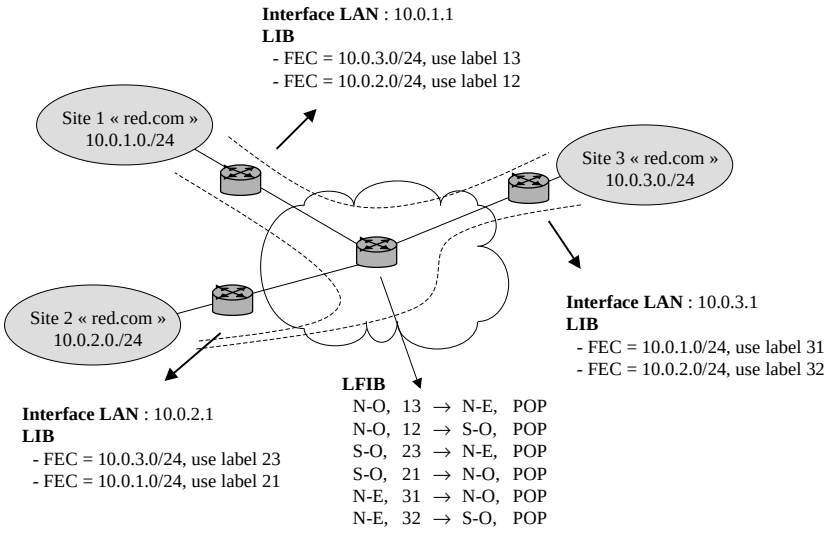
FAI : 193.190.0.0/16
Les routeurs du « backbone »
utilisent uniquement cette adresse

Interface WAN : 193.190.10.22
Interface LAN : 10.0.2.1
Tunnels IP
- 10.0.1.0/24, via 193.190.10.11
- 10.0.3.0/24, via 193.190.10.33

Solution MPLS simple

- **Principe de base**
  - Création **manuelle** de LSP entre routeurs « clients » des différents sites appartenant à un même VPN
    - *Même principe que les VPN basés sur Frame Relay ou ATM*
  - Avantages
    - *Solution évolutive*
      - » Une seule connexion physique à configurer pour chaque nouveau site
      - » La bande passante offerte à chaque LSP peut être modifiée aisément
  - Inconvénients
    - *Support de MPLS*
      - » Nécessaire à la fois au niveau des routeurs « clients » des sites et des routeurs du « backbone » MPLS
    - *Configuration lourde*
      - » Les routeurs « clients » doivent être reconfigurés pour chaque nouveau site
      - » Les routeurs du « backnone » doivent également être configurés pour chaque nouveau LSP

Architecture MPLS simple

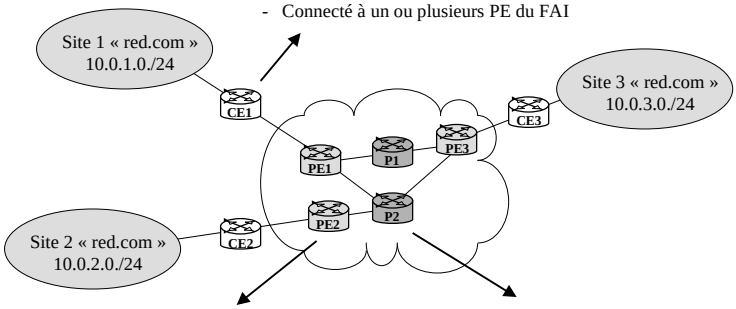


Solution MPLS améliorée

- **Comment trouver une solution ?**
  - Qui soit la plus automatique possible
    - *Pour les clients des différents VPN*
    - *Pour le fournisseur d'accès également*
  - Qui facilite l'ajout de nouveaux sites à un VPN
    - *En nécessitant seulement la configuration*
      - » Des routeur « client » des nouveaux sites
      - » Des routeur du FAI connectés directement aux routeurs « client » des nouveaux sites

Architecture MPLS améliorée

Customer Edge Router
- Ne supporte pas MPLS
- Ne connaît pas l'architecture réseau du FAI
- Transmet uniquement des paquets IP au FAI
- Connecté à un ou plusieurs PE du FAI



Provider Edge Router
- Possède une configuration par VPN (exemple : une table de routage par VPN)
- Pour chaque site d'un VPN, nécessite de connaître le PE connecté à ce site

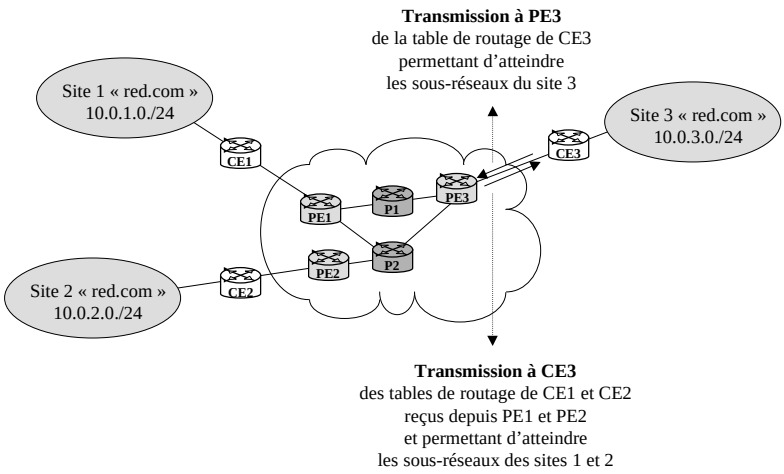
Supportent MPLS

Provider Router
- Possède une configuration indépendante de tout VPN
- Configuré par le FAI indépendamment de l'existence de tout VPN

Routage entre CE et PE (1)

- **Comment distribuer les routes apprises ?**
  - En utilisant un protocole de routage dynamique
    - *Exemple : RIP, OSPF, etc.*
  - Chaque CE d'un VPN(α) doit transmettre à son ou ses PE paires
    - *Les routes apprises pour atteindre les sous-réseaux localisées sur son site*
  - En retour, le ou les PE paires doivent annoncer au CE en question
    - *Les routes à suivre pour atteindre les sous-réseaux localisés sur d'autre sites, mais appartenant au même VPN(α)*
    - *Ces routes seront transmises depuis d'autres PE connectés à des CE du même VPN(α)*

Routage entre PE et CE (2)

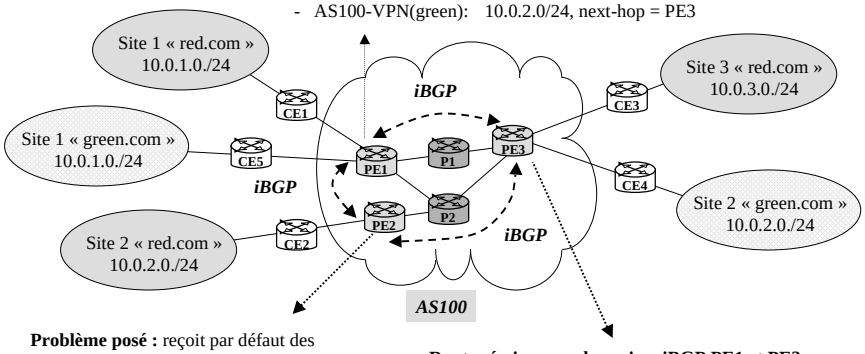


Routage entre PE (1)

- **Problème posé**
  - Impossible de distribuer directement les tables de routage des CE
    - *Les sites des différents VPN peuvent en effet utiliser les mêmes systèmes d'adressage privés*
- **Solution proposée**
  - Distribuer non pas des adresses IP, mais des adresses IP-VPN composées de deux éléments
    - *Un identifiant appelé RD (Route Distinguisher) composé*
      - » D'un identifiant de FAI (ex : numéro AS de système autonome)
      - » D'un identifiant de VPN
    - *Une adresse de sous-réseau*
      - » Située à l'intérieur du VPN identifié au sein du RD
  - Utiliser des extensions de BGP (Border Gateway Protocol)
    - *MP-iBGP = entre PE d'un même AS (MP=MultiProtocol, i=interior)*
    - *MP-eBGP = entre PE de différents AS (e=exterior)*

Routage entre PE (2)

Routes reçus des paires iBGP
- AS100-VPN(red): 10.0.2.0/24, next-hop = PE2
- AS100-VPN(red): 10.0.3.0/24, next-hop = PE3
- AS100-VPN(green): 10.0.2.0/24, next-hop = PE3



Problème posé : reçoit par défaut des routes inutiles (celles du VPN-green)
Quelle solution ? Chaque PE peut transmettre à ses paires la liste des VPN dont il souhaite recevoir les routes (via une notion de communauté)

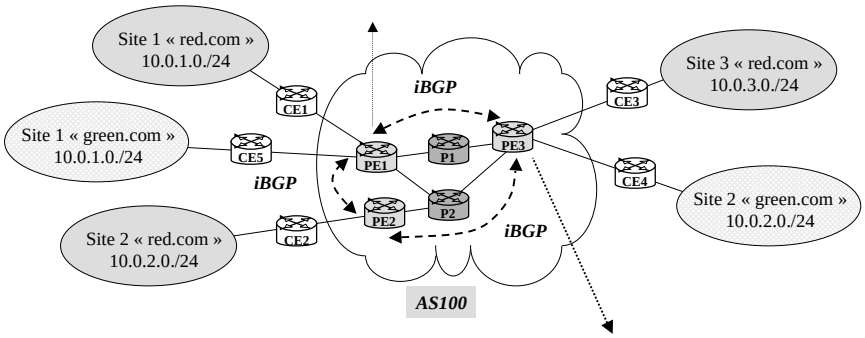
Routes émises vers les paires iBGP PE1 et PE2
- AS100-VPN(red): 10.0.3.0/24, next-hop = PE3
- AS100-VPN(green): 10.0.2.0/24, next-hop = PE3

Commutation de labels

- **Utilisation de deux niveaux de labels**
  - Un premier niveau de label
    - *Utilisé par les PE pour atteindre les PE apparaissant comme prochain saut dans leurs tables de routage*
  - Un deuxième niveau de label
    - *Utilisé par les PE pour atteindre le bon CE*
      - » Chaque PE allouera un label à chaque CE/VPN auquel il est connecté
- **Distribution des labels**
  - Utilisation de LDP à l'intérieur du backbone
    - *Entre routeurs P et PE, ou P et P*
  - Utilisation de MP-BGP
    - *Entre routeurs PE en transmettant simultanément routes et labels*

Distribution des labels de niveau 2

Routes et labels reçus du paire iBGP PE3
- AS100-VPN(red): 10.0.3.0/24, next-hop = PE3, **PUSH(22)**
- AS100-VPN(green): 10.0.2.0/24, next-hop = PE3, **PUSH(33)**



Routes et labels émis vers les paires iBGP PE1 et PE2
- AS100-VPN(red): 10.0.3.0/24, next-hop = PE3, **PUSH(22)**
- AS100-VPN(green): 10.0.2.0/24, next-hop = PE3, **PUSH(33)**

Label Information Base
- Ouest, **Label = 22** → N-E, **POP**
- Ouest, **Label = 33** → S-E, **POP**

Distribution des labels de niveau 1

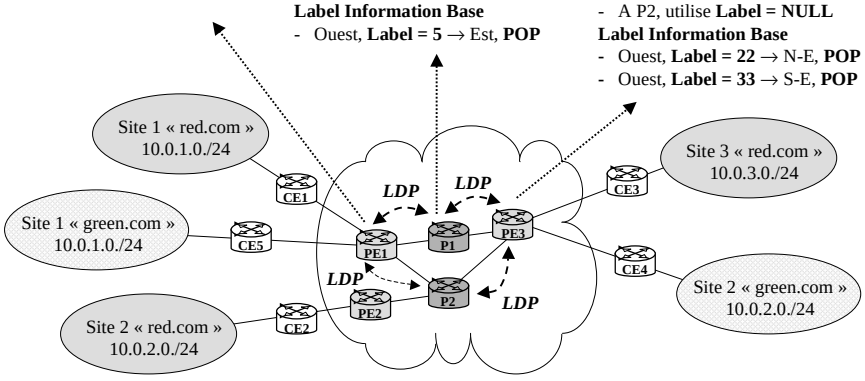
Label Information Base
- PE3 → Est, **PUSH(5)**

Annonces de P1 pour FEC=PE3
- A PE1, utilise **Label = 5**

Label Information Base
- Ouest, **Label = 5** → Est, **POP**

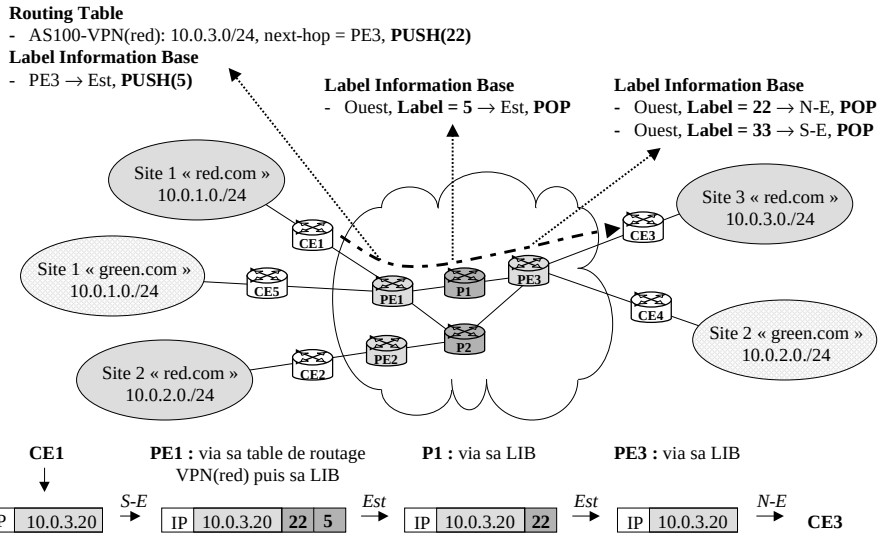
Annonces de PE3 pour FEC=PE3
- A P1, utilise **Label = NULL**
- A P2, utilise **Label = NULL**

Label Information Base
- Ouest, **Label = 22** → N-E, **POP**
- Ouest, **Label = 33** → S-E, **POP**



Label = NULL pour indiquer un saut ultime (penultimatehop)

Exemple final de commutation



Bibliographie

- **Quelques ouvrages**
  - I. Pepelnjack and J. Guichard, « **MPLS and VPN Architectures** », Cisco Press Editor (2001)
    - *Exemples pratiques de configuration*
  - U. Black, « **MPLS and Label Switching Networks** », Prentice Hall Editor (2002)
    - *Reprend les principales RFC liées à MLPS*
  - B. Davie and Y. Rekhter « **MPLS Technology and Applications** », Morgan Kaufman (2000)
    - *Excellent rapports sur « www.amazon.com »*