

# Le fonctionnement de l'Internet

## *Architecture, Routage*

Alexandre Fenyö  
EUnet France  
<fenyo@eunet.fr>

## 1 Introduction

Techniquement, l'Internet, né des recherches de la DARPA<sup>1</sup>, et de ses expérimentations sur le réseau ARPANET, est le plus grand ensemble de réseaux d'ordinateurs décentralisés. La DARPA commença à travailler sur une technologie d'interconnexion vers le milieu des années 70 et les protocoles TCP/IP qui en résultèrent prirent rapidement leur forme définitive. Comprenant que les communications deviendraient une partie vitale de la recherche scientifique, la NSF<sup>2</sup>, aux Etats-Unis, joua un rôle actif dans l'évolution de l'Internet. Pour cela, elle subventionna un réseau grande distance, NSFNET, qui reliait la plupart des centres de calcul américains, et qui est maintenant sous la responsabilité de l'ANS<sup>3</sup>. NSFNET fut de plus relié à ARPANET. Depuis, de nombreux autres réseaux, de différents pays, vinrent se greffer sur l'épine dorsale<sup>4</sup> qu'est NSFNET, et qui offre les lignes les plus rapides.

L'Internet n'est administré par aucun groupe. C'est un ensemble de réseaux distincts, administrés localement par des groupements qui se sont mis d'accord sur un ensemble de protocoles communs pour relier leurs réseaux les uns aux autres. Ces protocoles sont établis et officialisés par l'IETF<sup>5</sup> qui est dérivée de l'Internet Society, l'instance principale responsable de la résolution des problèmes concernant l'Internet et de la recherche en matière de réseaux. Une nouvelle organisation, l'InterNIC, née d'un Consortium entre AT&T et General Atomics, fournit de nombreux services d'information à la communauté Internet, dont par exemple les listes de domaines accessibles.

Au premier septembre 1994, la NSF dénombrait, sur l'Internet, 38307 réseaux, parmi 84 pays, dont 1648 en France. Mark Lottor du SRI recensait en juillet 1994 plus de 3212000 ordinateurs, répartis au sein de 46000 domaines (dont 71900 ordinateurs dans le domaine français), ce qui représente environ 20 millions d'utilisateurs de par le monde.

## 2 Les protocoles de l'Internet

L'Internet est un réseau à commutation de paquets avec encapsulation en couches, on peut ainsi l'opposer aux réseaux à commutation de circuits, tel Transpac, ou le RTC<sup>6</sup>. La famille des protocoles TCP/IP permet aux différentes machines de l'Internet de communiquer entre elles.

Ces protocoles sont organisés en couches. Ceux d'une couche sont prestataires de services pour la couche directement supérieure, et utilisent les services de la couche directement inférieure, ceux d'une même couche pouvant éventuellement être amenés à coopérer. On trouve les protocoles TCP/IP à partir de la couche Réseau, les couches inférieures pouvant transporter différentes familles de protocoles, ce qui permet à un même réseau physique de faire communiquer ses machines par TCP/IP, et aussi, sur le même support, par d'autres protocoles, tel que DEC-Net.

Chaque protocole d'une couche ajoute un en-tête aux données que lui fournit le protocole de couche supérieure. C'est par le contenu et la nature des informations qui figurent dans cette en-tête que l'on

---

1. Defense Advanced Research Projects Agency  
2. National Science Foundation  
3. Advanced Network System  
4. backbone  
5. Internet Engineering Task Force  
6. Réseau Téléphonique Commuté

peut définir les fonctionnalités d'une couche. La figure 1 présente les quatre couches les plus basses du modèle.

Couches	Protocoles			
Transport	TCP	UDP	ICMP	
Réseau	IP		ARP	RARP
Liaison de Données	LLC 802.2			
	FDDI	802.3	802.4	802.5
Physique	ethernet, paire torsadée, etc...			

Figure 1: Encapsulation en couches des protocoles

## 2.1 La couche Physique

Il existe différentes technologies pour relier les machines d'un réseau local. Les principaux média sont la paire torsadée, le câble coaxial fin, le câble coaxial épais, et la fibre optique. Le médium choisi est souvent destiné à une couche liaison de données particulière, qui transitera dessus. Ainsi, par exemple, la fibre optique est destinée aux réseaux FDDI, le câble coaxial aux réseaux Ethernet ou IEEE 802.3, la paire torsadée aux réseaux en anneau à jeton, mais ce n'est pas une règle absolue.

Le choix d'une couche physique particulière est lié aux capacités du média, la paire torsadée étant moins performante que l'Ethernet fin, qui est lui-même moins performant que l'Ethernet épais. Il est à noter qu'un même médium peut avoir des capacités distinctes, dépendant de la couche liaison de données qui l'accompagne. Par exemple, le débit de la paire torsadée sur réseau LocalTalk est moindre que celui de la paire torsadée sur réseau LANSTAR AppleTalk. La figure 2 présente une comparaison des performances des média les plus couramment utilisés.

	paire torsadée LocalTalk	paire torsadée LANSTAR	ethernet fin	ethernet épais
Débit	230,4 Kbps	2,56 Mbps	10 Mbps	10 Mbps
longueur maximum	1000 ft	2000 ft en étoile	segment : 656 ft réseau : 3281 ft	segment : 1640 ft réseau : 8202 ft
distance entre les noeuds	pas de minimum	pas de minimum	8,2 ft. minimum	8,2 ft. minimum
nombre maximum de noeuds	32	1344	segment : 30 réseau : 1023	segment : 200 réseau : 1023

Figure 2: Les différents média - Source : Apple Computer Inc.

## 2.2 La couche liaison de données

La couche liaison de données est souvent découpée en deux sous-couches distinctes : la sous-couche LLC<sup>7</sup> supérieure (IEEE 802.2) est commune pour toutes les sous-couches MAC<sup>8</sup> inférieures possibles, que sont le FDDI (ISO 9314-2), le IEEE 802.3 CSMA/CD très proche de l'ethernet (architecture en bus), le IEEE 802.4 (bus à jeton) et le IEEE 802.5 (anneau à jeton).

Les principaux rôles de cette couche sont, d'une part de contrôler l'accès au médium, et d'autre part, de permettre l'échange de paquets d'informations entre les machines *directement* connectées sur un même support physique. Pour cela, l'en-tête des messages émis par la couche liaison de données contient les adresses de la machine émettrice (adresse source), de la machine réceptrice (adresse destination), et le type de paquet encapsulé (IP, ARP ou RARP). Dans le cas d'un réseau local ethernet, il s'agira d'adresses

7. Logical Link Control

8. Medium Access Control

ethernet à six octets. Il ne faut pas confondre ces adresses avec les adresses IP, qui n'ont pas le même rôle. L'adresse destination ethernet d'une trame référence la machine directement connectée au même réseau que la machine émettrice (par exemple le routeur par défaut de ce réseau), alors que l'adresse IP destination du paquet IP encapsulé dans cette même trame référence la machine ultime qui devra recevoir ce paquet, après qu'il ait traversé toute l'interconnexion de réseaux qui la sépare de la machine émettrice. Il existe une adresse de diffusion particulière qui permet d'émettre une trame à destination de toutes les machines connectées sur le médium.

## 2.3 La couche réseau

La couche réseau est la première couche faisant réellement partie de la famille des protocoles TCP/IP. On y trouve les protocoles IP<sup>9</sup>, ARP<sup>10</sup> et RARP<sup>11</sup>.

### 2.3.1 Le protocole IP

Le protocole IP constitue la clef de voute des protocoles TCP/IP. Les paquets IP encapsulent les données des couches supérieures en rajoutant un en-tête qui contient les champs d'information suivants :

- numéro de version du protocole ;
- longueur de l'en-tête ;
- type de service : permet de préciser la qualité de service demandée, les performances requises en termes de délai, de sécurité et de débit ;
- longueur totale du paquet ;
- identification ;
- options de fragmentation : permet de préciser si le paquet peut éventuellement être fragmenté en plusieurs paquets, au cas où il aurait à traverser un réseau ne supportant pas un paquet aussi large ;
- déplacement du fragment par rapport au paquet initial ;
- TTL<sup>12</sup> : indication du nombre maximum de passerelles pouvant encore être traversées, avant destruction du paquet - ce champs est décrémenté par chaque passerelle traversée ;
- numéro du protocole transporté dans les données (TCP, UDP, ICMP, etc...) - ce champs précise le type de protocole sous-jacent ;
- somme de contrôle sur l'en-tête ;
- adresse IP source ;
- adresse IP destination ;
- options : les options des paquets IP permettent, par exemple, d'enregistrer les routes suivies par les paquets, ou d'imposer ces routes.

### 2.3.2 Le protocole ARP

ARP est un protocole qui permet d'associer dynamiquement les adresses IP des machines avec les adresses physiques de leur médium de communication. Ainsi, par exemple, une machines désireuse d'émettre un paquet IP à destination d'une autre machine directement connectée au même réseau local, ne connaît que l'adresse IP destination, pas l'adresse ethernet destination, qui est pourtant nécessaire afin de pouvoir encapsuler le paquet IP dans une trame ethernet pour l'émettre sur le réseau. Pour cela, elle va utiliser le protocole ARP.

### 2.3.3 Le protocole RARP

Il peut arriver qu'une machine ne connaisse pas sa propre adresse IP, mais seulement son adresse physique (ethernet). C'est le cas pour les machines sans disque, comme les terminaux X, par exemple. Pour connaître son adresse IP, qui lui est nécessaire afin d'émettre des paquets IP (car un des champs de l'en-tête IP est précisément l'adresse IP source), elle peut utiliser le protocole RARP qui permet d'interroger un serveur RARP, qui connaît, lui, l'adresse IP de la machine en question.

---

9. Internet Protocol

10. Address Resolution Protocol

11. Reverse ARP

12. Time To Live

## 2.4 La couche transport

Les principaux protocoles de la couche transport sont au nombre de trois : TCP<sup>13</sup> qui sert à fournir un service fiable d'échange de flot continu de données aux protocoles des couches supérieures, UDP<sup>14</sup> qui sert à fournir un service d'échange de datagrammes aux protocoles des couches supérieures, et ICMP<sup>15</sup> qui sert à transporter des informations de service, comme par exemple des accusés de réception (réponse au protocole ping), des informations sur l'état des connexions des passerelles, etc...

Les en-têtes des paquets TCP et UDP contiennent une information dite numéro de port, qui permet de distinguer les différents services qui, sur une même machine, utilisent ces protocoles. Ainsi, à chaque point d'accès TCP, par exemple, est associé un numéro de port. Cela permet à plusieurs processus, sur une même machine, d'utiliser TCP en même temps, et ça permet au système d'exploitation de savoir à quel processus envoyer les données d'un paquet TCP qui vient d'arriver. Le principe est le même pour UDP.

## 2.5 Les couches supérieures

Les couches supérieures à la couche transport proposent des services de toutes sortes, en utilisant soit TCP, soit UDP. Parmi ces services, on trouve les fameux FTP, Gopher, World Wide Web, Wais, telnet, irc, etc...

# 3 Le routage

Le Routage est l'opération qui consiste à acheminer un paquet d'informations à travers une interconnexion de réseaux. Pour cela, on dispose de quatre types d'appareils distincts : les répéteurs, les ponts<sup>16</sup>, les routeurs, et les passerelles<sup>17</sup>. Chacun agit au niveau d'une couche distincte, et possède au moins deux interfaces, connectées à des réseaux physiques distincts.

## 3.1 Les répéteurs

Les répéteurs possèdent exactement deux interfaces, et agissent au niveau de la couche physique. Leur rôle est d'amplifier le signal capté sur une interface, et de le retransmettre sur l'autre. Les interfaces des répéteurs ne possèdent donc pas d'adresse physique, et a fortiori pas d'adresse IP. La figure 3 présente le principe du répéteur.

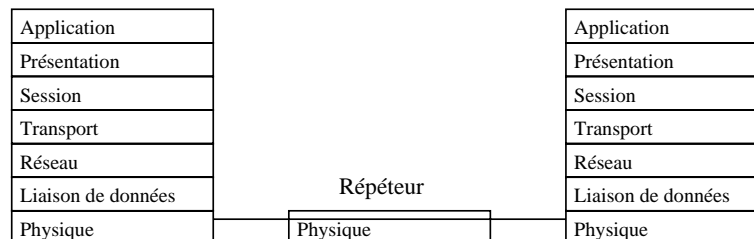


Figure 3: Principe du répéteur

## 3.2 Les ponts

Les ponts possèdent au moins deux interfaces, et agissent au niveau de la couche liaison de données. Leur rôle est donc de récupérer les trames qui arrivent sur une de leurs interfaces, et de les retransmettre sans modification sur une ou plusieurs de leurs autres interfaces. La figure 4 présente le principe du pont.

---

13. Transport Control Protocol  
14. User Datagram Protocol  
15. Internet Control Message Protocol  
16. Bridges  
17. Gateways

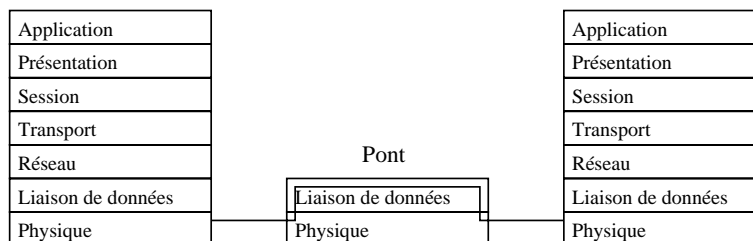


Figure 4: Principe du pont

On dénombre quatre principaux types de ponts, chacun utilisant un algorithme de commutation de paquets différents : l'algorithme de pont transparent, celui de l'arbre couvrant, celui de routage par la source, et enfin l'algorithme mixte.

### 3.2.1 Les ponts transparents

Les ponts transparents sont très populaires dans le monde des réseaux locaux ethernet et IEEE 802.3. Dès qu'il est mis sous tension, le pont transparent analyse toutes les adresses MAC sources qu'il reçoit, et il en déduit depuis quelles interfaces il peut atteindre les machines correspondantes, et range le résultat dans une table interne. A chaque fois qu'il reçoit une trame dont l'adresse destination correspond à une entrée de sa table, il la renvoie sur l'interface correspondante, et dans le cas contraire, il renvoie la trame sur toutes les interfaces autres que celle d'origine.

L'algorithme, mis en oeuvre pour la première fois par DEC<sup>18</sup> est donc simple mais il n'est pas adapté aux réseaux possédant des boucles, lorsque, par exemple, une destination est atteignable à travers plusieurs ponts situés sur le même tronçon ethernet local.

### 3.2.2 L'algorithme de l'arbre couvrant

C'est encore DEC qui a mis en oeuvre cet algorithme pour la première fois. Il a été créé afin de préserver les bénéfices des boucles en éliminant leurs inconvénients. Cet algorithme s'appuie sur un résultat bien connu de la théorie des graphes : pour tout graphe composé de noeuds reliés deux-à-deux par des branches, il existe un arbre couvrant, sans boucle, qui préserve la connectivité totale de l'arbre.

L'algorithme est implémenté par échanges de paquets entre les différents ponts du réseau, afin de pouvoir calculer l'arbre couvrant. A chaque liaison entre deux ponts adjacents est associée un coût, et un pont particulier est choisi comme racine de l'arbre. Sur chaque tronçon du réseau, un seul pont a le droit de retransmettre des paquets vers ou depuis ce tronçon, c'est celui pour lequel le coût vers la racine est le plus faible. Ainsi, les boucles sont évitées, et si un pont ne fonctionne plus, la topologie de l'arbre est automatiquement recalculée, on ne perd donc pas l'intérêt de placer plusieurs ponts entre deux mêmes tronçons.

### 3.2.3 Le routage par la source

Cet algorithme a été développé par IBM, et on le retrouve principalement dans les réseaux en anneau à jeton. Quand une machine A veut envoyer des paquets à une machine B, elle commence par envoyer une trame d'exploration, qui est remise par chaque pont sur toutes les interfaces qu'il possède, exceptée bien sûr l'interface d'où provient la trame. De plus, des informations de routage y sont rajoutées. Quand la machine B reçoit une ou plusieurs trames d'exploration de A, elle les lui renvoie directement avec les informations de routage. Ensuite, A choisit, parmi les trames reçues, le chemin qui lui parait le meilleur pour atteindre B. Ensuite, dans toutes les trames à destination de B, A insère des informations de routage qui permettent à chaque pont de savoir sur quelle interface retransmettre la trame.

### 3.2.4 Le routage mixte

Il est parfois nécessaire d'interconnecter des réseaux en anneau à jeton, et des réseaux ethernet. On se retrouve donc devant le problème de l'interconnexion de réseaux utilisant des algorithmes différents, et

18. Digital Equipment Corporation

incompatibles, au niveau des ponts. Pour résoudre le problème, le routage mixte a été inventé. Il consiste à interconnecter les deux ensembles de réseaux par un pont particulier qui implémente les deux algorithmes précités, et qui sait transférer des informations de l'un vers l'autre. Il n'y a pas de méthode générale pour ce type d'implémentation, chaque constructeur propose sa solution propre.

### 3.3 Les routeurs

Les routeurs possèdent au moins deux interfaces, et agissent au niveau de la couche réseau. Leur rôle est donc de récupérer les trames qui arrivent sur une de leurs interfaces, de décapsuler les paquets IP contenus dans les trames MAC, et de renvoyer ces paquets sur une autre interface, encapsulés dans de nouvelles trames MAC. Pour déterminer l'interface sur laquelle un paquet doit être réémis, les routeurs consultent leurs tables de routage IP.

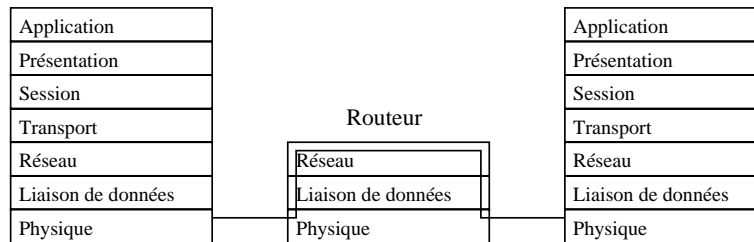


Figure 5: Principe du routeur

### 3.4 Les passerelles

Les passerelles agissent au niveau de la couche application. Leur rôle est d'intercepter les informations au plus haut niveau, et de les retransmettre vers une autre machine.

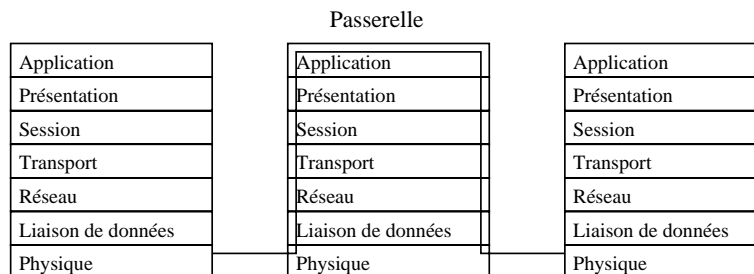


Figure 6: Principe de la passerelle

### 3.5 Exemple récapitulatif

La figure 7 présente un exemple récapitulant les fonctions des différents types de matériels que l'on peut trouver sur un réseau.

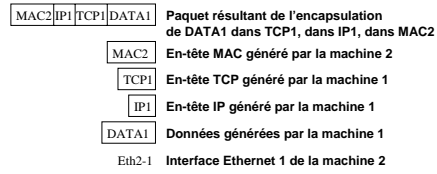
## 4 Les protocoles de routage

Pour être relié à l'Internet, un réseau doit être connecté à un fournisseur de service, lui-même déjà relié à l'Internet : un ISP<sup>19</sup>. A chaque ISP, correspond un système autonome, appelé AS<sup>20</sup>, et caractérisé par un numéro. Un AS est une entité qui regroupe un certain nombre de réseaux qui partagent une même politique de routage. Un réseau ne peut bien sûr appartenir qu'à un seul AS. Ainsi, en France, les deux

19. Internet Service Provider

20. Autonomous System

Dans notre exemple, la machine 1 veut envoyer une requête d'interrogation gopher à la machine 4, en interrogeant la machine 3, qui joue le rôle d'un agent proxy gopher. Ainsi, les données envoyées par la machine 1 vont successivement traverser le réseau jusqu'à la machine 4, au travers d'un répéteur, d'un pont, d'un routeur, et de la passerelle qui comprend l'agent proxy.



Pour dire que les adresses MAC source et destination de MAC1 sont respectivement les adresses MAC des interfaces Eth1-1 et Eth2-1, on notera : MAC1 : SRC=Eth1-1, DST=Eth2-1  
On suivra le même principe pour les en-têtes IP.

On a donc :  
 MAC1 : SRC=Eth1-1, DST=Eth2-1  
 MAC2 : SRC=Eth2-2, DST=Eth3-1  
 MAC3 : SRC=Eth3-2, DST=Eth4-1  
 IP1 : SRC=Eth1-1, DST=Eth3-1  
 IP3 : SRC=Eth3-2, DST=Eth4-1

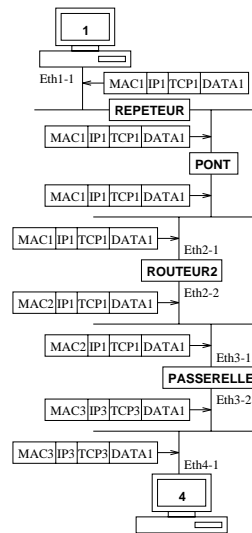


Figure 7: Exemple récapitulatif

principaux AS sont l'AS-1889 correspondant à l'ISP EUNET-France, et l'AS-1717 correspondant à l'ISP Rénater.

La notion d'AS est fondamentale dans le fonctionnement du routage sur l'Internet. Son principe est basé sur la connaissance de tables de routage, qui indiquent pour chaque machine ou réseau destination, la passerelle directement connectée par laquelle il faut passer pour atteindre, par le plus court chemin, cette destination. Pour mettre à jour ces tables, il faut utiliser des protocoles de routage dynamique, qui sont implémentés sur les passerelles.

Il existe deux types de protocoles de routage : les protocoles de routage de passerelle interne, et les protocoles de routage de passerelle externe. Grâce aux premiers, les passerelles d'un même AS peuvent échanger les informations de routage sur les différents réseaux constituant cet AS, et les seconds permettent aux différents AS d'échanger entre-eux les informations de routage récupérées via les premiers.

## 4.1 Les protocoles de passerelle interne

Parmi les protocoles de passerelle interne, on oppose les protocoles basés sur les vecteur-distances, tels que RIP ou IGRP, à ceux basés sur les états des liens, tel qu'OSPF. Les premiers consistent, pour chaque passerelle, à émettre des paquets à destination de ses plus proches voisines, renseignant sur ses tables de routage, et notamment pour chaque destination, une donnée renseignant sur la distance nécessaire pour l'atteindre. L'unité exprimant cette distance dépend du protocole utilisé. Les protocoles basés sur les états des liens consistent à informer de l'état des liens du réseau, afin que chaque passerelle puisse déterminer la topologie générale du réseau.

### 4.1.1 Le protocole RIP

RIP<sup>21</sup> a été développé par Xerox. RIP n'est pas seulement utilisé au sein de la communauté Unix, il est aussi à la base des protocoles de routage implémentés sur micro-ordinateurs tels que les protocoles de Novell ou AppleTalk, qui en sont dérivés.

RIP fonctionne par échanges de paquets d'informations de routage entre différentes passerelles, chaque paquet comprenant une liste de réseaux destination, et pour chacun le routeur le plus proche pour cette route, et le nombre de sauts à effectuer pour atteindre la destination. Le nombre de sauts correspond au nombre de passerelles qu'un paquet devra traverser afin d'atteindre ce but. RIP ne maintient, pour une destination donnée, que la meilleure route, c'est-à-dire celle pour laquelle le nombre de sauts est le plus faible. Pour accroître sa stabilité, RIP considère qu'une machine distante de plus de 15 sauts ne peut pas être atteinte. Cela interdit ainsi l'utilisation de RIP dans le cadre des réseaux de grande envergure.

21. Routing Information Protocol

### 4.1.2 Le protocole IGRP

IGRP<sup>22</sup> est un protocole développé par Cisco Systems, plus robuste que RIP et qui n'est pas limité, comme RIP, à 15 sauts maximum. Il a ainsi été adopté par de nombreuses organisations qui disposent de réseaux de grande envergure. IGRP étant un protocole de routage à vecteur-distance, il utilise donc un ensemble de métriques pour déterminer les routes les plus courtes. Pour cela, il se base sur les délais, la largeur de bande, la fiabilité et la charge du réseau.

### 4.1.3 Le protocole OSPF

OSPF<sup>23</sup> est quant à lui un protocole développé par l'IETF<sup>24</sup>, pour succéder à RIP. OSPF divise un AS en zones, chacune étant constituée d'un ensemble de réseaux et de machines contigus. De plus, une épine dorsale<sup>25</sup>, comprenant le réseau des routeurs reliant les différentes zones, est chargée de distribuer les informations de routage entre les différentes zones. La topologie de chaque zone est ainsi cachée pour les autres zones.

Le routage OSPF est basé sur la connaissance de l'état des liens sur le réseau, ce qui permet de calculer au sein de chaque routeur la topologie du réseau et le plus court chemin vers chaque destination.

## 4.2 Les protocoles de passerelle externe

Les protocoles de passerelle externe permettent aux différents AS d'échanger entre eux les informations d'accessibilités de leurs réseaux. Les deux principaux sont EGP<sup>26</sup> et BGP<sup>27</sup>.

### 4.2.1 Le protocole EGP

EGP a été le premier protocole de passerelle externe à être largement diffusé. Son principe est très simple, mais il est assez limité. Trois fonctions sont implémentées au sein d'un routeur EGP. Tout d'abord, le routeur doit acquérir des voisins, c'est-à-dire choisir d'autres routeurs EGP, pas forcément physiquement voisins, mais avec lesquels il pourra communiquer. Ensuite, le routeur EGP vérifie régulièrement l'accessibilité de ses voisins. Et enfin, il échange avec chacun d'eux des informations sur l'accessibilité de ses réseaux. Ces informations sont très rudimentaires, et ne contiennent pas, par exemple, d'indication de métrique.

### 4.2.2 Le protocole BGP

BGP est une tentative de résolution des principaux problèmes d'EGP. Il est destiné, à terme, à le remplacer sur l'Internet. EGP est plus un protocole renseignant sur l'accessibilité, qu'un réel protocole de routage. Au contraire, BGP fournit de vraies indications de routage : pour une destination donnée, il fournit la liste des AS à traverser pour l'atteindre. De plus, BGP a été étudié afin de détecter les boucles de routage, ce qu'EGP ne sait pas faire.

## 5 Conclusion

Comme on vient de le voir, l'Internet est constitué d'un ensemble de réseaux sur lesquels une multitude de protocoles coopèrent pour transporter des flux d'informations entre les différentes machines qui veulent communiquer. Les adresses des réseaux IP sont pour l'instant codées sur 4 octets, dans les paquets IP. L'Internet est à un stade de son existence où le nombre de réseaux attribués, en constante augmentation, mène les plages d'adresses disponibles à saturation. IPNG<sup>28</sup>, une nouvelle version du protocole IP, avec des adresses plus longues, est à l'étude. D'ici quelques années, IPNG devra définitivement remplacer IP, si l'Internet ne veut pas suffoquer. Ce passage, obligatoire, va impliquer un énorme investissement et les solutions techniques ne sont pas encore toutes trouvées. L'Internet est maintenant à l'aube d'un tournant majeur de son histoire.

---

22. Interior Gateway Routing Protocol

23. Open Shortest Path First

24. Internet Engineering Task Force

25. Backbone

26. Exterior Gateway Protocol

27. Border Gateway Protocol

28. IP Next Generation