

Les activités et quizz du chapitre sont disponibles sur frederic-junier.org.

1 Internet le réseau des réseaux

1.1 Réseau local

Un **réseau local** relie des ordinateurs ou assimilés (tablettes, smartphone, box internet ...) et des objets connectés (ampoules, caméra ...) qui peuvent dialoguer sur un support filaire ou par ondes radio. Des **protocoles** de la couche réseau comme **Ethernet** (câble RJ45), **Wifi** ou **Bluetooth** fixent les règles du dialogue entre les différents **hôtes** du réseau. Pour se connecter à un réseau local, un équipement a besoin d'une **interface ou carte réseau**, qui est identifiée de façon unique par une adresse physique **MAC**, notée sur 48 bits en notation hexadécimale, qui se présente sous la forme `fc:f8:ae:31:cb:67`.

1.2 Internet histoire d'un réseau mondial

Il existait déjà des réseaux locaux d'ordinateurs dans les années 1950. À partir des années 1960, des chercheurs ont réfléchi à la problématique de l'interconnexion de réseaux hétérogènes. Le principe de la **transmission de paquets** est introduit par **Paul Baran et Davies** en 1961 : il consiste à découper les données en paquets, ce qui permet de transmettre à débit variable (un courriel nécessite l'envoi ponctuel de petits paquets alors que pour un transférer un fichier, il faut envoyer rapidement de gros paquets). **Arpanet**, le projet de réseau interuniversitaire financé par l'*Arpa* (agence de recherche de la défense américaine), voit le jour en 1969 sous la direction de **Leonard Kleinrock** : les données sont découpées en paquets transmis en séquence les uns à la suite des autres. Dans les années 70, **Louis Pouzin**, après un séjour au **MIT**, développe en France le réseau *Cyclades* qui est le premier véritable réseau à **commutation de paquets** : les paquets transitent de façon indépendante dans le réseau grâce à un protocole qui préfigure Internet Protocol puis sont remis en l'ordre à l'arrivée. Le circuit des paquets est donc variable contrairement à la **commutation de circuits** implémentée dans le réseau téléphonique.

Aux États-Unis, **Vinton Cerf et Robert Kahn** s'inspirent des idées de Pouzin et inventent les protocoles IP et TCP. L'interconnexion des réseaux Arpanet et Csnnet en 1983 avec TCP/IP marque la naissance d'Internet et son expansion au niveau mondial dans les sphères universitaires et de la recherche.

En 1989, **Tim Berners-Lee** invente le Web. L'ouverture des protocoles Web au grand public en 1993 connaît un succès fulgurant, d'autres services Internet comme le Mail ou le transfert de fichier de Pair à pair se popularisent aussi et le trafic Internet explose : de quelques Megabits par secondes en 1992, on est passé à près de 100 Terabits par seconde en 2018 avec près de 3,2 milliards d'internautes en 2016.



Définition 1

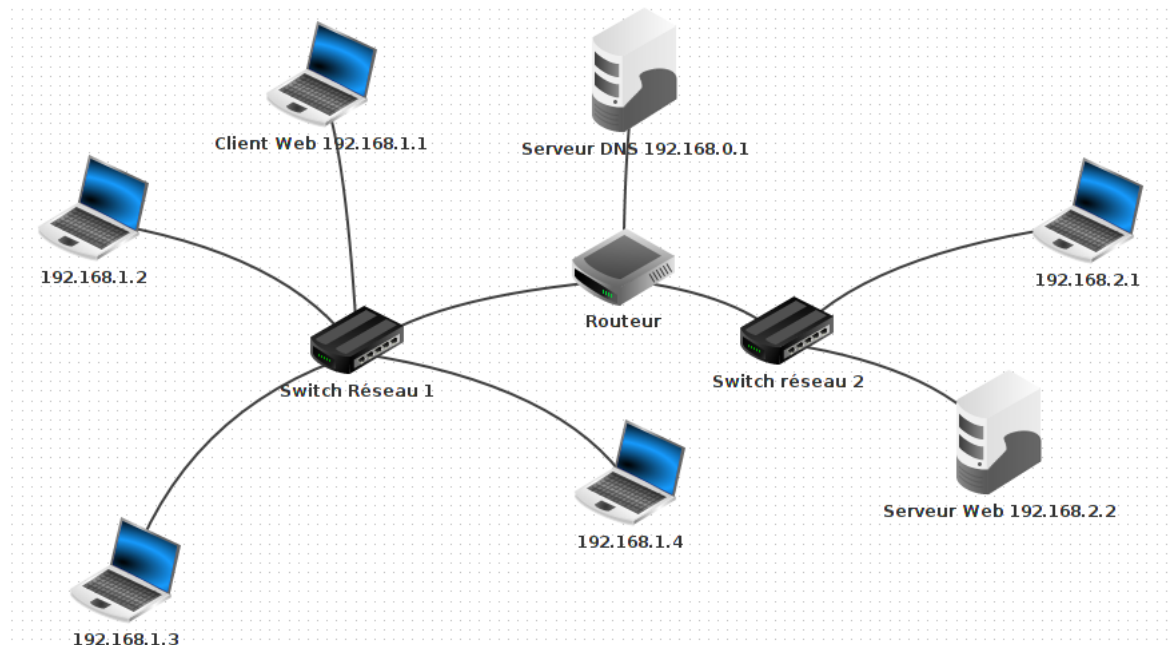
Internet est un réseau mondial d'interconnexion de réseaux d'ordinateurs basés sur des infrastructures hétérogènes. Les machines d'Internet communiquent grâce à Internet Protocol (IP) et d'autres protocoles standardisés par l'**Internet Engineering Task Force**.

2 Les protocoles d'Internet

2.1 Architecture client/serveur

Comme la plupart des services d'Internet, le Web repose sur une **architecture client/serveur**.

Pour comprendre le rôle des protocoles d'Internet, analysons les échanges de données lorsqu'un **client** demande une page Web à un **serveur** sur l'interconnexion de réseau présentée ci-dessous.

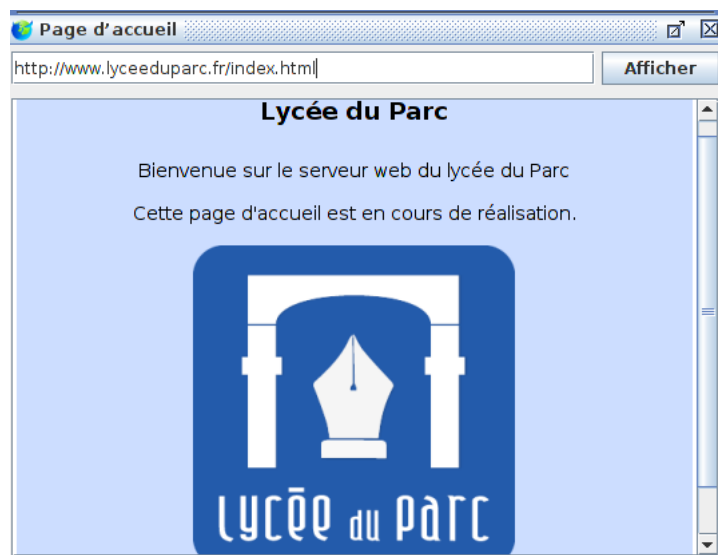


On y distingue deux réseaux locaux constitués autour de **switch** qui sont interconnectés par un **routeur**. Chaque machine est localisée par une adresse IP. Le client Web est sur la machine d'adresse 192.168.1.1 et le serveur sur celle d'adresse 192.168.2.2. Un troisième élément, le serveur DNS se trouve sur la machine d'adresse 192.168.0.1 connectée directement au routeur.

Définition 2

Une adresse IP est constituée de quatre nombres entre 0 et 255 séparés par des points, comme par exemple 176.181.101.215. C'est un identifiant unique qui permet de repérer une machine dans une interconnexion de réseaux où s'exécute le protocole IP. Certaines plage d'adresses comme 192.168.X.Y ne peuvent être utilisées que sur des réseaux locaux, ce sont des adresses privées non routables sur Internet.

Pour accéder à la page d'accueil du serveur, on saisit dans la barre d'adresse du navigateur du client, son adresse sur le Web nommée **URL**, par exemple ici <http://www.lyceeduparc.fr/index.html>.



Presque instantanément, on obtient l’affichage de la page, mais entre la requête du client et la réponse du serveur, plusieurs paquets de données ont été échangés, comme l’illustre la capture ci-dessous.

Échanges de données

Client Web 192.168.1.1 - 192.168.1.1

No.	Date	Source	Destination	Protocole	Couche	Commentaire
83	12:05:42.124	192.168.1.254:521	255.255.255.255:520		Application	192.168.1.254 192.168.0.254 16 75000 192.168.2.0 255.255.255.0 0 192.168.0.0 255.255.255.0 0
84	12:06:06.294	192.168.1.1:10930	192.168.0.1:53		Application	ID=9419 QR=0 RCODE=0 QDCOUNT=1 ANCOUNT=0 NSCOUNT=0 ARCOUNT=0 www.lyceeduparc.fr. A IN
85	12:06:06.602	192.168.0.1:53	192.168.1.1:10930		Application	ID=9419 QR=1 RCODE=0 QDCOUNT=0 ANCOUNT=1 NSCOUNT=0 ARCOUNT=0 www.lyceeduparc.fr. A 3600 192.168...
86	12:06:06.608	192.168.1.1:61471	192.168.2.2:80	TCP	Transport	SYN, SEQ: 2140764252
87	12:06:07.015	192.168.2.2:80	192.168.1.1:61471	TCP	Transport	SYN, ACK: 2140764253, SEQ: 2588922235
88	12:06:07.019	192.168.1.1:61471	192.168.2.2:80	TCP	Transport	ACK: 2588922236
89	12:06:07.070	192.168.1.1:61471	192.168.2.2:80		Application	GET /index.html HTTP/1.1 Host: www.lyceeduparc.fr
90	12:06:07.477	192.168.2.2:80	192.168.1.1:61471	TCP	Transport	ACK: 2140764254
91	12:06:07.528	192.168.2.2:80	192.168.1.1:61471		Application	HTTP/1.1 200 OK Content-type: text/html <html> <head> <meta charset="UTF-8"> <title>Pa...
92	12:06:07.541	192.168.1.1:61471	192.168.2.2:80	TCP	Transport	ACK: 2588922237
93	12:06:07.592	192.168.1.1:61471	192.168.2.2:80		Application	GET logo-parc.png HTTP/1.1 Host: www.lyceeduparc.fr
94	12:06:07.997	192.168.2.2:80	192.168.1.1:61471	TCP	Transport	ACK: 2140764255
95	12:06:08.048	192.168.2.2:80	192.168.1.1:61471		Application	HTTP/1.1 200 OK Content-type: image/png iVBORwOKGqAAAANSUHElqAAPEAAADxCAYAAAAy1EJAAAABmJLR0QA...

No.: 89 / Date: 12:06:07.070

- Réseau
 - Source: 63:5A:B8:0B:58:31
 - Destination: 59:68:22:9E:2A:CF
 - Commentaire: 0x800
- Internet
 - Source: 192.168.1.1
 - Destination: 192.168.2.2
 - Protocole: IP
 - Commentaire: Protocole:6, TTL: 64
- Transport
 - Source: 61471
 - Destination: 80
 - Protocole: TCP
 - Commentaire: SEQ: 2140764253
- Application
 - Commentaire: GET /index.html HTTP/1.1 Host: www.lyceeduparc.fr

2.2 Des paquets structurés en couches

Le paquet de données d’index 89, contient la requête du client. Comme il s’agit d’une requête Web, elle est formulée dans le protocole HTTP avec la méthode GET. On observe que le paquet de données contient également des en-têtes disposés en couches :

- une couche **transport** où s’exécute le protocole TCP, avec le numéro de séquence du paquet;
- une couche **internet** où s’exécute le protocole IP, avec les adresses IP de l’émetteur et du destinataire;
- une couche **réseau** ou **liaison** où s’exécute des protocoles comme Ethernet ou Wifi, avec les adresses MAC de l’émetteur et du destinataire;
- une couche **application** où s’exécutent les protocoles de services applicatifs comme le Web (HTTP) ou le courriel (SMTP).

2.3 Routage des paquets avec IP

Internet Protocole ou IP est le protocole chargé du routage des paquets.

Chaque paquet IP contient l’adresse de l’émetteur et du destinataire.

Des **routeurs** sont placés aux frontières des réseaux locaux et permettent aux paquets IP de traverser les réseaux jusqu’au destinataire. Les **routeurs** jouent le rôle de centres de tri postal, ils acheminent les paquets grâce à des **tables de routage** et à des **algorithmes de routage**.

IP s’exécute sur chaque machine rencontrée par un paquet lors de son trajet.

2.4 Transmission fiable et contrôle de flux avec TCP

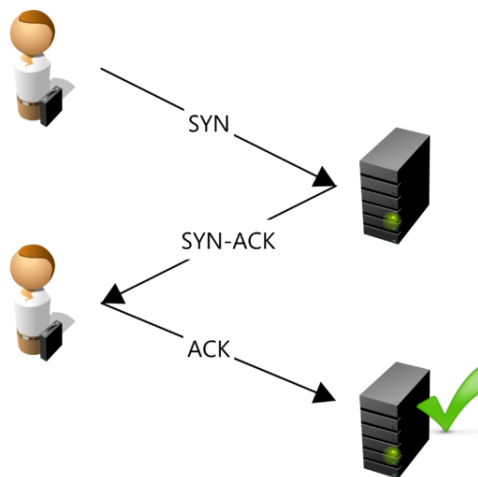
Transmission Protocole ou TCP est le protocole chargé du service qualité de l'acheminement.

Avec IP les paquets sont acheminés de façon indépendante. Si on transmet un fichier, les différents paquets peuvent arriver dans le désordre selon l'état du réseau, certains peuvent être perdus.

TCP s'exécute de bout en bout c'est-à-dire uniquement sur l'émetteur et le destinataire et pas sur les routeurs. Il garantit la **fiabilité** et la **qualité** du transport avec plusieurs mécanismes :

- Chaque paquet reçu est acquitté avec un accusé de réception. Dans l'exemple, le paquet d'index 90 est l'accusé de réception transmis par le serveur 192.168.2.2 au client 192.168.1.1 pour l'informer de la bonne réception de sa requête d'index 89. Si l'accusé de réception n'est pas reçu au bout d'un certain délai, il est réémis.
- Les paquets ont des numéros de séquence qui permettent à TCP de reconstituer l'ensemble chez le destinataire.
- Des vérifications d'erreurs de transmission sont effectués avec des calculs de sommes de contrôle.
- Un contrôle de flux est effectué avec ralentissement de l'émission en cas de congestion du réseau.

De plus, lors d'un échange de données TCP établi, une **connexion** entre le client et le serveur ce qui permet de réserver des espaces mémoires sur les machines et d'échanger des clefs de chiffrement pour sécuriser la communication. Des séquences de paquets TCP spécifiques marquent le début et la fin d'une connexion. Dans l'exemple, les paquets d'index 86, 87 et 88 initialisent une connexion entre le client et le serveur Web : ce schéma est appelé **three handshake**.



Source : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tcp_normal_2.png

2.5 Utilisation d'adresses symboliques avec DNS

Une requête Web est formulée dans le navigateur du client avec une **URL** comme :

`http://www.lyceeduparc.fr/index.html`. Pour router les paquets sur Internet il faut l'adresse IP du destinataire.

Avant d'envoyer sa requête HTTP, le navigateur doit donc associer à l'adresse symbolique du serveur ou **nom de domaine** son adresse IP. Pour cela, il interroge un serveur DNS (pour Domain Name System). Dans notre exemple, la requête DNS a pour index 84, elle est envoyée par le client 192.168.1.1 au serveur DNS 192.168.0.1.

Bien entendu, le client doit disposer dans sa configuration de l'adresse IP d'au moins un serveur DNS. La réponse du serveur DNS d'index 85 contient l'adresse IP du domaine `www.lyceeduparc.fr`

84	12:06:06.294	192.168.1.1:10930	192.168.0.1:53	Application	ID=9419 QR=0 RCODE=0 QDCOUNT=1 ANCOUNT=0 NSCOUNT=0 ARCOUNT=0	www.lyceeduparc.fr. A IN
85	12:06:06.602	192.168.0.1:53	192.168.1.1:10930	Application	ID=9419 QR=1 RCODE=0 QDCOUNT=0 ANCOUNT=1 NSCOUNT=0 ARCOUNT=0	www.lyceeduparc.fr. A 3600 192.168...
86	12:06:06.608	192.168.1.1:61471	192.168.2.2:80	TCP	Transport	SYN, SEQ: 2140764252
87	12:06:07.015	192.168.2.2:80	192.168.1.1:61471	TCP	Transport	SYN, ACK:2140764253, SEQ: 2588922235
88	12:06:07.019	192.168.1.1:61471	192.168.2.2:80	TCP	Transport	ACK: 2588922236
89	12:06:07.070	192.168.1.1:61471	192.168.2.2:80	Application	GET /index.html HTTP/1.1	Host: www.lyceeduparc.fr
90	12:06:07.477	192.168.2.2:80	192.168.1.1:61471	TCP	Transport	ACK: 2140764254
91	12:06:07.528	192.168.2.2:80	192.168.1.1:61471	Application	HTTP/1.1 200 OK	Content-type: text/html <html> <head> <meta charset="UTF-8"> <title>Pa...

No.: 85 / Date: 12:06:06.602

- Réseau
 - Source: 59:68:22:9E:2A:CF
 - Destination: 63:5A:BB:0B:5B:31
 - Commentaire: 0x800
- Internet
 - Source: 192.168.0.1
 - Destination: 192.168.1.1
 - Protocole: IP
 - Commentaire: Protocole:17, TTL: 63
- Transport
 - Source: 53
 - Destination: 10930
 - Protocole: UDP
- Application
 - Commentaire: ID=9419 QR=1 RCODE=0 QDCOUNT=0 ANCOUNT=1 NSCOUNT=0 ARCOUNT=0 www.lyceeduparc.fr. A 3600 192.168.2.2

3 Les services d'Internet

3.1 Des protocoles applicatifs

Chaque application d'Internet s'appuie sur des protocoles qui s'exécutent de bout en bout après reconstitution des données par TCP. Pour garantir l'interopérabilité, ces protocoles sont standardisés au niveau international par des organisations comme le **W3C** pour les standards du Web.

- le protocole du Web est HTTP;
- les protocoles de messagerie électronique sont SMTP pour l'émission et POP ou IMAP pour la réception ou la consultation;
- un protocole d'échange de fichier en mode client/serveur est HTTP;
- un protocole de contrôle à distance de machine est SSH.

Tous ces protocoles existent désormais sous une forme sécurisée, avec un suffixe `s` comme `https` avec l'ajout d'un protocole de sécurisation et de chiffrement comme TLS au niveau de la couche application.

3.2 Les réseaux pair-à-pair

Des protocoles de réseau **pair-à-pair** permettent l'échange de fichier dans des réseaux où chaque machine joue à la fois le rôle de client et de serveur.

Sur ces réseaux, les requêtes de fichier sont de petite taille et les envois de blocs de fichier de grande taille, cela pose problème si la machine client/serveur dispose d'une connexion (ADSL par exemple) avec des débits descendants et montants asymétriques.

Des protocoles comme `BitTorrent` résolvent le problème avec un découpage des fichiers en petits morceaux distribués sur l'ensemble des machines du réseau et pour développer la coopération, il faut mettre à disposition des morceaux du fichier pour pouvoir en acquérir de nouveaux.

Les réseaux pair à pair offrent de formidables possibilités de partage communautaire mais ils sont malheureusement trop souvent utilisés pour du téléchargement illégal de ressources soumises au droit d'auteur. En France, l'**Hadopi** est chargée d'observer les usages et de protéger les oeuvres numériques.

L'article **Les réseaux de pair-à-pair** du site **Interstices** présente ces réseaux à travers leurs évolutions.

4 Perspectives d'évolution

4.1 La pénurie d'adresses IP

Internet repose sur le protocole IP défini dans les années 1970. Les adresses IPv4 codées sur 4 octets soit 32 bits offrent 2^{32} soit un peu plus de 4 milliards d'adresses.

Cet espace d'adressage était suffisant aux débuts d'Internet mais ne l'est plus maintenant avec l'explosion des usages d'Internet : en 2019 on a près de 4 milliards d'internautes et près de 27 milliards d'objets connectés!

Certaines plages d'adresses IP dites privées peuvent être utilisées sur des réseaux locaux différents mais elles ne sont plus routables sur Internet. On distingue alors IP privée et IP publique : sur un réseau pédagogique de lycée ou sur le réseau d'un particulier, toutes les machines ont des adresses IP privées distinctes mais partagent une même adresse IP publique : celle de leur routeur.

Préfixe	Plage IP	Nombre d'adresses
10.0.0.0/8	10.0.0.0 - 10.255.255.255	$2^{32-8} = 16\ 777\ 216$
172.16.0.0/12	172.16.0.0 - 172.31.255.255	$2^{32-12} = 1\ 048\ 576$
192.168.0.0/16	192.168.0.0 - 192.168.255.255	$2^{32-16} = 65\ 536$

Source : Wikipedia

Avec la version 6 du protocole IP, les adresses IP sont codées sur 128 bits soit 32 octets ce qui permettra de résoudre le problème de **pénurie d'adresses** IP avec un nombre gigantesque de 2^{128} adresses disponibles. Toutes les machines du réseaux pourront recevoir une adresse IP unique routable sur Internet. La mise en place d'IPv6 est cependant progressive car il faut mettre à jour des millions de machines.

4.2 La neutralité d'Internet

La **neutralité d'internet** est le principe qui consiste pour un Fournisseur d'Accès à Internet (FAI) à transporter tous les contenus sans discrimination avec la même priorité. En 2017, les États-Unis ont abrogé ce principe ce qui permet à un FAI de passer des accords avec un diffuseur pour acheminer plus rapidement ses contenus et rompt le principe d'égalité entre tous les usagers d'Internet.

Une **tribune de Benjamin Bayart** traite de ce sujet sur le site **La quadrature du net**, association de défense des libertés numériques.

4.3 Le coût écologique

Le coût écologique du numérique en émissions de gaz à effets de serre est déjà supérieur à celui de l'aviation et devrait dépasser bientôt celui de l'automobile. Alors que la vidéo représentera 80 % du trafic en 2020, essentiellement pour du divertissement, et que le nombre d'objets connectés va exploser, un usage plus responsable d'Internet mérité d'être réfléchi. Certaines organisations comme **The shift project** produisent déjà des analyses et des recommandations.