

RAPPORT AU GOUVERNEMENT SUR L'ÉTAT DE DEPLOIEMENT DU PROTOCOLE IPV6 EN FRANCE

Juin 2016

L'Arcep a fait appel à l'expertise technique de l'Association française pour le nommage internet en coopération (Afnic) dans le cadre de ce projet. Elle tient à remercier les équipes de l'Afnic pour leur aide précieuse.

Préambule

Le présent rapport répond à une demande d'avis sur l'état de déploiement du protocole IPv6 en France adressée par madame Axelle Lemaire, secrétaire d'Etat chargée du numérique, à l'Autorité de régulation des communications électroniques et des postes (ci-après « l'Arcep » ou « l'Autorité »).

Par un courrier daté du 11 janvier 2016, enregistré par l'Arcep le 13 janvier 2016, madame Axelle Lemaire a invité l'Autorité (i) à dresser un état des lieux précis du déploiement d'IPv6 en France, (ii) à identifier les difficultés et obstacles liés à cette transition, (iii) à proposer un ensemble d'actions et mesures de nature à encourager et accompagner les utilisateurs et les entreprises et enfin (iv) à mettre en place un observatoire annuel de la transition IPv6 en France permettant d'évaluer l'état d'avancement de cette transition.

L'Arcep a fait appel à l'expertise technique de l'Association française pour le nommage internet en coopération (Afnic) dans le cadre de ce projet. Elle tient à remercier les équipes de l'Afnic pour leur aide précieuse.

*
* *

Aux termes de cette étude, l'Arcep propose au Gouvernement plusieurs actions de nature à promouvoir et accompagner la transition vers IPv6 :

	Montrer l'exemple
1	<i>en s'engageant dans des délais ambitieux à rendre accessibles en IPv6 tous les sites web et services en ligne de l'Etat.</i>
	Généraliser l'enseignement d'IPv6
2	<i>aussi bien dans les formations initiales que continues, afin de lever, par la pédagogie, les freins à l'adoption du protocole IPv6.</i>
	Mettre en place les espaces d'échanges adéquats pour la communauté
3	<i>afin de fédérer la communauté et de permettre un échange sur les bonnes pratiques et les expériences individuelles.</i>
	Améliorer la coordination entre parties prenantes
4	<i>en rendant publiques les intentions de court et moyen termes des acteurs majeurs de la transition.</i>
	Mieux informer l'utilisateur
5	<i>notamment sur la pérennité des terminaux dont il dispose et les possibles dysfonctionnements liés aux mécanismes de rationnement des adresses IPv4.</i>
	Préparer la fin d'IPv4
6	<i>en permettant, à terme, aux acteurs qui souhaitent rationaliser la gestion de leurs réseaux de pouvoir se passer définitivement du protocole IPv4.</i>

Ces actions sont détaillées dans la suite du rapport.

Table des matières

1	Introduction	5
2	Considérations techniques préliminaires	6
2.1	Protocole IP et adressage	6
2.2	Pénurie d'adresses IPv4, mécanismes de contournement et leurs limites	7
2.2.1	Epuisement des adresses IPv4.....	7
2.2.2	Contournement de la pénurie d'adresse au moyen du protocole NAT	8
2.3	Le protocole IPv6.....	9
2.3.1	Apports.....	9
2.3.2	Adoption du protocole	10
3	Etat de la transition vers IPv6 en France	11
3.1	Indicateurs pertinents	11
3.1.1	Infrastructure de noms de domaine	11
3.1.2	Fournisseurs d'accès à internet	12
3.1.3	Fournisseurs de services, contenus et applications.....	12
3.1.4	Intermédiaires techniques	13
3.1.5	Equipements et terminaux.....	13
3.2	Etat des lieux du déploiement d'IPv6 en France	14
3.2.1	Infrastructure de noms de domaine	14
3.2.2	Fournisseurs d'accès à internet	14
3.2.3	Fournisseurs de services, contenus et applications.....	15
3.2.4	Intermédiaires techniques	16
3.2.5	Equipements et terminaux.....	16
3.3	Comparatif des niveaux de déploiement d'IPv6	17
3.4	Mise en place d'un observatoire national	18
3.5	Conclusion.....	19
4	Coûts et risques liés à un retard dans la transition.....	19
4.1	Freins à la transition	19
4.1.1	Manque d'intérêt immédiat.....	20
4.1.2	Absence de coordination entre les acteurs.....	20
4.1.3	Manque de maturité autour du protocole IPv6	20
4.1.4	Maintien en parallèle des réseaux IPv4	21
4.2	Inconvénients liés à un retard.....	21
4.2.1	Maintien de plus en plus complexe d'IPv4.....	22

4.2.2	Dysfonctionnement de certains services	22
4.2.3	Moindre résilience des réseaux.....	23
4.2.4	Freins à l'innovation et perte en compétitivité	24
4.3	Conclusion.....	24
5	Leviers permettant d'encourager la transition.....	25
5.1	Montrer l'exemple.....	25
5.2	Généraliser l'enseignement d'IPv6.....	26
5.3	Mettre en place les espaces d'échanges adéquats	26
5.4	Améliorer la coordination entre parties prenantes	27
5.5	Mieux informer l'utilisateur	27
5.6	Préparer la fin d'IPv4	28
5.7	Conclusion.....	28
6	Conclusion générale.....	30
	Glossaire.....	31

1 Introduction

Internet est désormais un bien commun, dont le bon fonctionnement durable constitue un enjeu crucial. Son essor a été rendu possible par le protocole IP, reposant historiquement sur le format d'adressage IPv4, pour l'identification des millions de machines qui le constituent.

Le succès d'internet et sa croissance exponentielle ont eu comme conséquence directe l'épuisement progressif de l'espace d'adresses IPv4* disponibles, certaines régions étant touchées plus que d'autres. Un tel épuisement est désormais inéluctable ; ses effets sont d'ores et déjà observables.

Afin de pallier cette pénurie prévue de longue date, le protocole IPv6* a été défini dès les années 90 pour succéder à IPv4. Grâce à son espace d'adressage quasi-illimité, IPv6 est à même de couvrir l'ensemble des besoins et usages futurs.

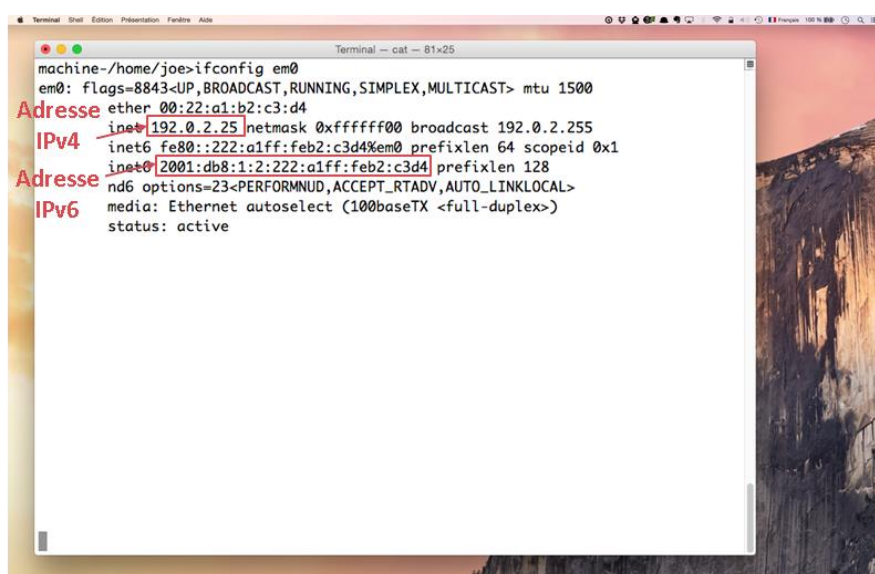


Figure 1 : Adresses IPv4 et IPv6 sur un poste fixe

La transition vers IPv6 s'inscrit dans un contexte international de coopération (gouvernance, normalisation, intérêt commun), d'une part, et de compétition entre Etats dans une économie mondialisée, d'autre part.

Cette transition peine encore à s'opérer, y compris en France. Dans ce contexte, le présent rapport constitue une contribution de l'Arcep aux réflexions du Gouvernement sur les moyens d'encourager et d'accompagner la transition du secteur et des utilisateurs vers le protocole IPv6.

En vue de préparer le présent rapport, l'Arcep a mené un cycle de rencontres l'ayant conduite à échanger avec plus d'une vingtaine d'acteurs du secteur (fournisseurs d'accès à internet, fournisseurs de contenus et d'applications, équipementiers, fédérations professionnelles, experts techniques, administrations et acteurs publics concernés)¹ ; plusieurs auditions formelles ont ensuite

* Les termes identifiés par (*) font l'objet d'explications détaillées dans le glossaire technique.

été organisées par le Collège de l'Autorité. Un questionnaire a en outre été adressé à plusieurs acteurs afin d'obtenir des renseignements techniques et des éléments quantitatifs susceptibles de l'enrichir.

Dans la suite, après des considérations techniques préliminaires sur le protocole IP et les formats d'adressage (section 2), un bilan précis de l'état de la transition en France est dressé : il s'accompagne d'une proposition d'observatoire national permettant d'évaluer annuellement l'état d'avancement de cette transition (section 3). Ensuite sont évalués les coûts et les risques liés à un retard de la France dans la transition vers IPv6 (section 4). Enfin, plusieurs leviers permettant d'encourager et d'accompagner cette transition sont présentés (section 5).

2 Considérations techniques préliminaires

Cette section vise à rappeler certains éléments techniques de base sur le protocole IP* et les normes d'adressage, afin de faciliter la lecture des paragraphes suivants.

La première partie porte sur le protocole IP, ses mécanismes d'adressage et la gestion de leurs ressources (2.1). La deuxième décrit les problématiques liées à la pénurie d'adresses IPv4, notamment sous l'angle des mécanismes de contournement qui ont été mis en place (2.2). La troisième et dernière partie introduit le protocole IPv6 et ses avantages par rapport à IPv4 (2.3).

2.1 Protocole IP et adressage

Internet repose sur le protocole IP, qui a été mis au point au cours des années 70, afin de définir les règles d'échange de données entre les réseaux constitutifs d'internet. Il spécifie, notamment, le format des adresses qui identifient les différents nœuds raccordés au réseau (serveurs, routeurs, terminaux clients...).

Dans la première version du protocole IP – IPv4 – les adresses sont constituées de 4 octets², présentés sous forme décimale du type 192.0.2.1. IPv4 offre un espace d'adressage total de près de 4,3 milliards d'adresses.

Il existe deux grandes familles d'adresses IPv4 : les adresses publiques et les adresses privées. Les adresses publiques identifient de manière unique une machine ou plus généralement un nœud du réseau internet à l'échelle mondiale. Cette unicité permet à un terminal d'être joint depuis n'importe quel point du réseau internet. Les adresses privées, à l'inverse, ne sont pas uniques. Elles sont utilisées dans l'adressage interne des réseaux privés – tels que les réseaux domestiques ou les réseaux d'entreprise – et ne peuvent par conséquent pas être jointes spontanément depuis un point extérieur au réseau.

S'agissant de ressources limitées en nombre, l'allocation des adresses IP est gérée de manière hiérarchique à l'échelle mondiale. L'IANA³, au sommet de cette hiérarchie, délègue les adresses, par

¹ Dont Bouygues Telecom, Cogent, Free, Level 3, Orange, SFR, Cisco, Nokia, Juniper Networks, OVH, Google, Tech'in France, RIPE, RENATER, INRIA, DGE, ANSSI, HADOPI, France-IX, G6, Cedexis, Nexidi...

² 1 octet* = 8 bits.

³ *Internet Assigned Numbers Authority.*

blocs, aux 5 autorités régionales (appelées Registres Internet Régionaux, RIR*). À leur tour, ces derniers se chargent d'allouer, chacun, des sous-blocs d'adresses IP aux différents registres Internet locaux (LIR*) de sa région (typiquement des fournisseurs d'accès à internet ou plus généralement des gestionnaires de réseaux), à la demande.

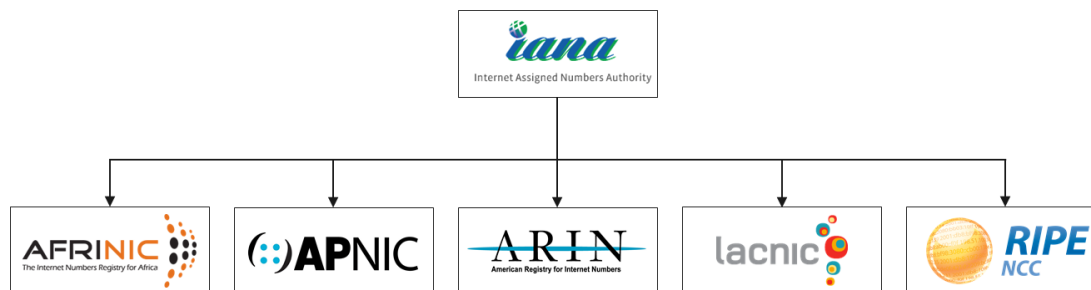


Figure 2 : Autorités régionales attribuant les adresses IP.

Les adresses faisant l'objet d'allocation de la part de ces Autorités sont les adresses publiques. Les plages d'adressage privées⁴ sont quant à elles utilisables librement par les opérateurs de réseaux locaux. Dans la suite, la pénurie d'adresses IPv4 fera donc essentiellement référence à la pénurie d'adresses IPv4 publiques.

2.2 Pénurie d'adresses IPv4, mécanismes de contournement et leurs limites

2.2.1 Épuisement des adresses IPv4

Le 14 septembre 2014, le RIPE-NCC, le registre régional dont dépend la France, a annoncé le début de l'attribution des adresses IPv4 du dernier bloc disponible. Au rythme actuel des attributions, l'épuisement de ce stock est prévu par le RIPE en 2021.

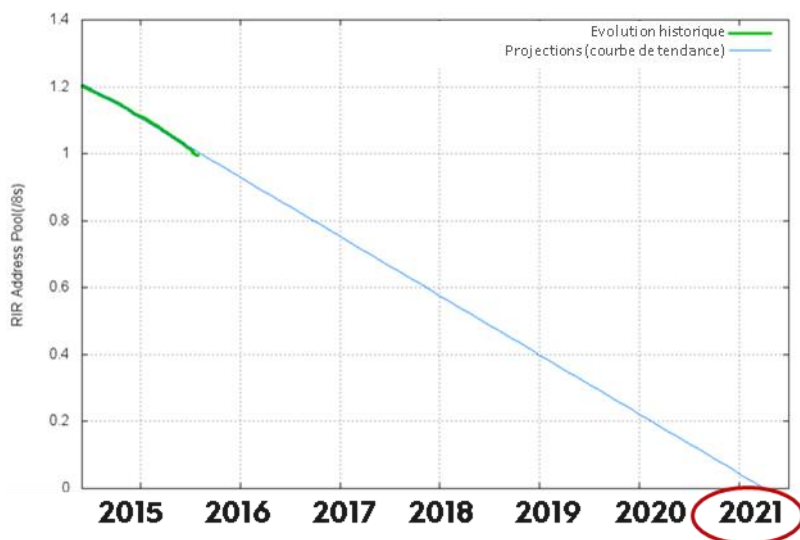


Figure 3 : Projection de l'épuisement des adresses IPv4 dans la région RIPE-NCC

⁴ Les plages d'adresses utilisables dans les réseaux privés (exemple : réseaux locaux) sont précisées par le [RFC 1918](#).

Cependant, dans les faits, les nouvelles règles associées à l'attribution de ces dernières adresses sont suffisamment restrictives pour que de nombreux acteurs (fournisseurs d'accès, hébergeurs, fournisseurs de contenus, ...) se trouvent déjà en situation de pénurie d'adresses IPv4, sans capacité de réapprovisionnement.

En conclusion de la dernière réunion du RIPE⁵, son président a ainsi lancé un avertissement solennel sur l'épuisement des adresses IPv4 et sur l'urgence d'adopter sans délai IPv6.

2.2.2 Contournement de la pénurie d'adresse au moyen du protocole NAT

L'épuisement des adresses IPv4 est désormais imminent.

En effet, le nombre de terminaux connectés au réseau internet a depuis longtemps dépassé le nombre d'adresses permis par la norme d'adressage. Pour arriver à ce résultat, les opérateurs ont mis en place des mécanismes permettant de contourner cette limitation et notamment une fonction nommée NAT* (*Network Address Translation*) qui consiste à partager une unique adresse IPv4 entre plusieurs terminaux.

En pratique, une seule machine dite *passerelle* se voit attribuer une adresse IPv4 publique. Celle-ci joue ensuite le rôle d'intermédiaire en assurant l'échange de paquets IP entre l'ensemble des terminaux d'un réseau privé (i.e. ne disposant que d'adresses IPv4 privées) et d'autres machines, appartenant à l'internet public. Cette technique permet d'économiser un nombre important d'adresses IPv4.

A titre d'illustration, l'utilisation du NAT est généralisée dans les réseaux domestiques par l'intermédiaire des passerelles plus connues sous la dénomination de « Box ». Les différents terminaux connectés en filaire ou en wifi se voient attribuer des adresses privées, la Box étant la seule à bénéficier d'une adresse publique lui permettant de communiquer sur internet.

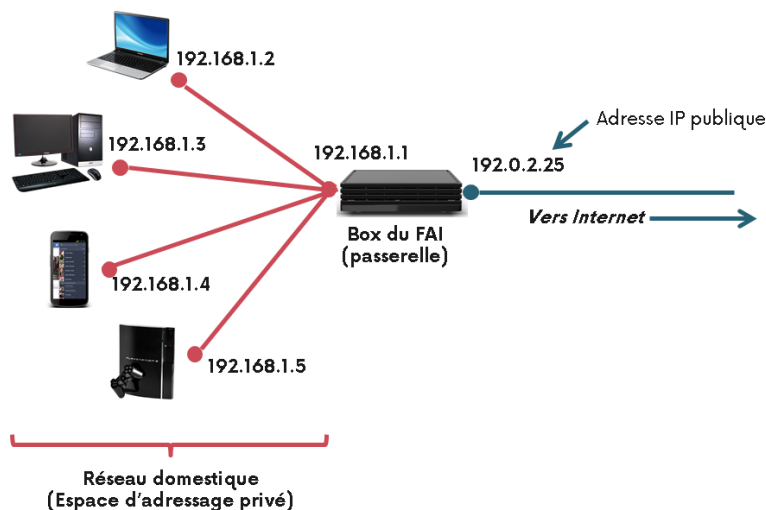


Figure 4 : Utilisation du NAT sur un réseau local

⁵ Du 23 au 27 mai 2016. Cf. tr #10, https://ripe72.ripe.net/presentations/186-RIPE72_Closing-Plenaryv2.pdf

Afin d'optimiser encore la gestion des ressources IP, ce schéma peut être reproduit à l'échelle du réseau d'un opérateur suivant la technique du CGN* (*Carrier Grade NAT*⁶). Les *Box* sont alors elles-mêmes dotées d'adresses privées et placées derrière une autre passerelle, située plus haut dans le réseau et bénéficiant d'une adresse publique.

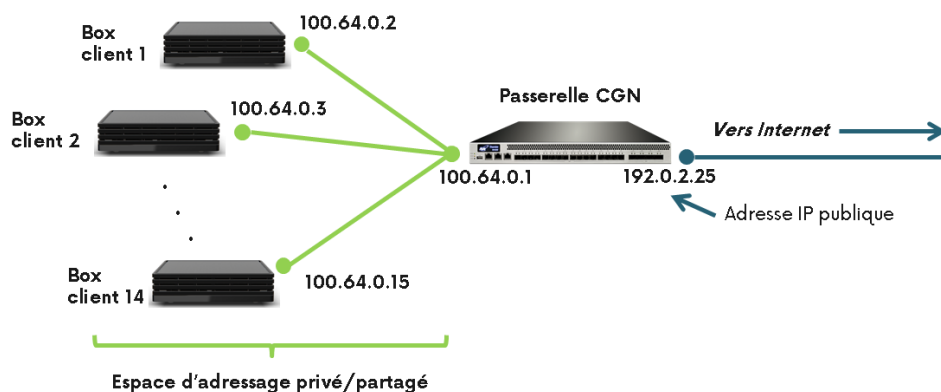


Figure 5 : Utilisation du CGN pour mettre plusieurs box derrière une passerelle

Cette technique, qui est de plus en plus utilisée, présente cependant plusieurs inconvénients, aussi bien sur le plan technique (dysfonctionnement de certaines applications, manque de résilience, etc.) que financier (coût de mise en œuvre, de maintenance, etc.). Ces derniers sont détaillés en section 4.2.

2.3 Le protocole IPv6

2.3.1 Apports

Le protocole IPv6, successeur d'IPv4, a été défini par l'IETF⁷ dès la fin des années 90. Cette nouvelle version offre un espace d'adressage beaucoup plus large.

En effet, avec des adresses constituées de 16 octets, il permet de générer environ $3,4 \times 10^{38}$ adresses uniques, de manière à répondre à l'ensemble des besoins actuels et futurs en termes d'adressage. Ce nombre d'adresses quasi-illimité permettra dans l'avenir d'attribuer à chaque terminal ou nœud du réseau une adresse IP individuelle afin de le rendre au besoin accessible directement depuis n'importe quel point du réseau internet, voire d'identifier plusieurs « *objets matériels ou logiciels* » (composants, processus, etc.) dans les terminaux et serveurs.

Mais les apports d'IPv6 vont au-delà de sa capacité d'adressage. En effet, cette nouvelle version du protocole IP prévoit de nouvelles fonctionnalités permettant notamment de simplifier certaines fonctions de la couche réseau, telles que le routage et la mobilité.

⁶ NAT à l'échelle du réseau.

⁷ *Internet Engineering Task Force*.*.

IPv6 intègre également les extensions de sécurité du réseau mieux que son prédécesseur, grâce à une ingénierie mieux pensée et à une gestion plus adaptées du protocole IPsec⁸.

Ces fonctionnalités, bien qu'initialement conçues pour fonctionner en IPv6, ont néanmoins été progressivement adaptées par la suite pour fonctionner en IPv4.

2.3.2 Adoption du protocole

Internet est constitué de plusieurs milliers de réseaux interconnectés, qui jouent des rôles différents dans l'acheminement du trafic.

Afin qu'un échange puisse s'effectuer en IPv6 de bout en bout (par exemple depuis un terminal utilisateur jusqu'à un serveur de contenus), il est indispensable que toute la chaîne technique soit compatible avec le protocole. Cela suppose donc dans notre exemple que toutes les conditions suivantes soient mutuellement satisfaites :

- que le terminal utilisateur soit compatible IPv6 (configuration réseau, système d'exploitation, applications concernées par l'échange...) ;
- que le résolveur DNS⁹ interrogé par le terminal puisse traduire (résoudre) les noms de domaines en adresses IPv6 (et vice versa) ;
- que l'hébergeur choisi par l'éditeur dispose d'une connectivité IPv6 ;
- que les contenus soient hébergés sur un serveur compatible IPv6 et que ses administrateurs aient rendu le contenu accessible en IPv6 ;
- et que tous les réseaux intermédiaires empruntés (FAI, transitaires...) puissent router le trafic IPv6.

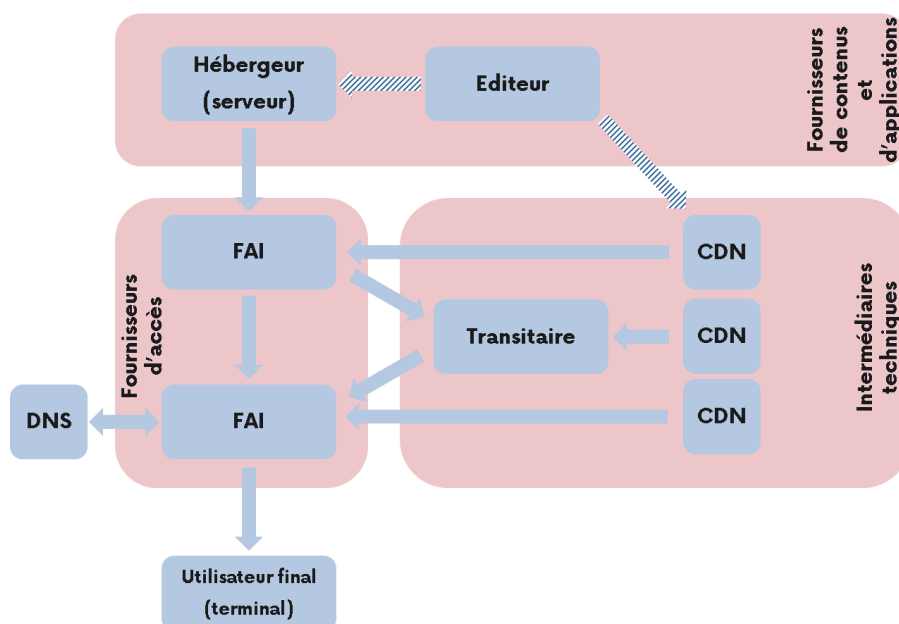


Figure 6 : Chaîne technique d'acheminement du trafic sur internet

⁸ Internet Protocol Security*.

⁹ Le DNS* (Domain Name System) est le système qui permet de faire correspondre un nom de domaine (exemple : www.arcep.fr) à une adresse IP, nécessaire pour pouvoir communiquer avec l'équipement.

Dans le cas où l'un de ces maillons fait défaut, un repli sur IPv4 est nécessaire. Celui-ci peut être géré par des passerelles permettant la conversion IPv6/IPv4 ou l'encapsulation des paquets IPv6 dans des paquets IPv4.

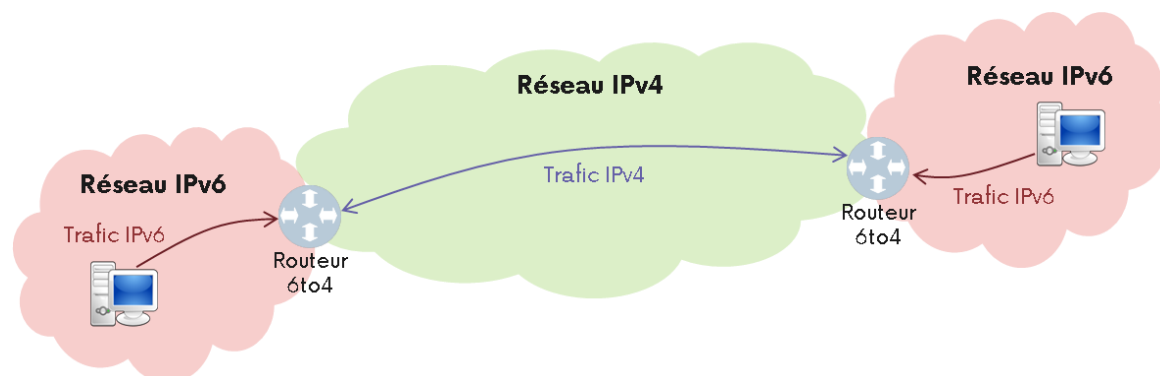


Figure 7 : Conversion en IPv4 lors d'une communication IPv6

Ces techniques sont cependant souvent complexes et coûteuses à mettre en œuvre ; de plus, elles ne permettent pas, à long terme, de pallier le manque d'adresses IPv4.

3 Etat de la transition vers IPv6 en France

Dans cette section, après quelques notions de métrologie utiles à la mesure du niveau de déploiement du protocole IPv6 dans les réseaux (3.1) est dressé un état lieu chiffré de la transition en France (3.2) ainsi qu'un comparatif avec d'autres pays engagés dans la transition (3.3). L'Autorité présente enfin le format de l'observatoire qu'elle propose de mettre en place à la demande du Gouvernement pour suivre l'état d'avancement de cette transition (3.4).

3.1 Indicateurs pertinents

Comme expliqué en section 2, la migration vers IPv6 doit concerner simultanément tous les maillons de la chaîne technique sur internet afin d'assurer un fonctionnement de bout en bout du protocole. Une évaluation de l'état et de la progression des déploiements ne peut donc pas se limiter à une seule catégorie d'acteurs. En effet, l'état de déploiement n'est pas le même aux différents maillons, l'ampleur de la tâche étant, par exemple, moindre pour des intermédiaires techniques (transitaires, ...) que pour les FAI qui doivent, au-delà de leur propre réseau, s'assurer de la compatibilité IPv6 des réseaux et terminaux dont dispose chacun de leurs clients.

Dès lors, plusieurs types d'indicateurs complémentaires permettent d'obtenir une vision d'ensemble du niveau de déploiement d'IPv6 dans l'infrastructure internet. Ces indicateurs font le plus souvent l'objet de publications par divers acteurs.

Cette section présente les différentes approches possibles pour mesurer le taux de pénétration d'IPv6 dans les réseaux. Les statistiques détaillées pour la France sont fournies en 3.2.

3.1.1 Infrastructure de noms de domaine

La compatibilité IPv6 de l'infrastructure DNS, permet de traduire des adresses IP en noms de domaines utilisés par les différentes applications utilisées sur internet (comme les noms de serveurs

web ou de *mails* par exemple), est indispensable pour qu'un réseau puisse assurer des communications en IPv6.

Ainsi, le déploiement d'IPv6 sur les serveurs DNS faisant autorité sur une zone (par exemple la zone « .fr ») peut constituer un indicateur pertinent pour le suivi de la transition vers IPv6.

L'Afnic, dans le cadre des publications annuelles relatives à l'observatoire de la résilience de l'Internet français mené par l'Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (ANSSI), fournit des statistiques en la matière pour la France, en s'appuyant sur les données à disposition du registre « .fr » dont elle a la responsabilité.

3.1.2 Fournisseurs d'accès à internet

Les FAI constituent un maillon central dans la transition vers IPv6.

En effet, IPv6 est généralement déployé de manière progressive, depuis le cœur des réseaux jusqu'à leurs extrémités. L'attribution d'adresses IPv6 aux utilisateurs finals couvre donc le « *dernier kilomètre* » de la chaîne, indispensable pour permettre des échanges en IPv6 de bout en bout.

La mesure du taux de pénétration d'IPv6 chez les FAI peut être réalisée de plusieurs manières.

Une première méthode consiste à se placer du point de vue d'un fournisseur de contenu ayant déployé IPv6. Celui-ci est en mesure de connaître le ratio de requêtes IPv6 dans l'ensemble des requêtes reçues depuis les utilisateurs d'un FAI ou d'un pays donné. Cette mesure peut cependant varier d'un fournisseur de contenu à l'autre en fonction des habitudes et des usages répandus chez des utilisateurs d'un FAI, voire d'un pays.

Cette méthode fait à ce jour l'objet de plusieurs observatoires privés¹⁰, dont les résultats sont publiquement accessibles et mis à jour fréquemment.

Une autre méthode consiste à mesurer en volume la part de trafic IPv6 dans l'ensemble du trafic acheminé par le FAI. Les résultats obtenus doivent cependant être interprétés avec précaution puisqu'il faut s'assurer que les utilisateurs bénéficiant d'adresses IPv6 ne génèrent pas un trafic significativement différent des autres utilisateurs¹¹. Cet indicateur reste cependant pertinent puisqu'une augmentation globale du trafic IPv6, même provoquée par un nombre limité d'utilisateurs d'un FAI donné, peut contribuer à l'accélération des déploiements chez d'autres catégories d'acteurs sur internet.

3.1.3 Fournisseurs de services, contenus et applications

Les fournisseurs de services, de contenus et d'applications (FCA) jouent un rôle crucial dans la transition vers IPv6. En effet, l'absence de contenus accessibles en IPv6 ou d'applications compatibles constitue un frein indéniable à la transition des autres catégories d'acteurs.

¹⁰ A titre d'exemple, [Google](#) et [Akamai](#) entretiennent des observatoires permettant le suivi de la progression de la pénétration d'IPv6 parmi les utilisateurs de leurs services.

¹¹ A titre d'exemple, l'Arcep observe que plusieurs plans de déploiements de FAI majeurs en France prévoient d'allouer des adresses IPv6 en priorité aux abonnés FttH, qui génèrent un trafic significativement plus important que les abonnés xDSL par exemple.

Une bonne métrique permettant de suivre l'évolution de la compatibilité IPv6 des sites *web* consiste à dénombrer les adresses IPv6 associées aux noms de domaine gérés par ces derniers, au niveau du DNS. En effet, ce référencement constitue généralement la dernière étape pour rendre accessible en IPv6 tout service en ligne fourni par un FCA.

Etant donné le grand nombre de sites *web* disponibles, les observatoires existants se limitent généralement, pour un pays donné, aux sites les plus populaires¹² en termes d'audience.

Plusieurs observatoires publics¹³ et privés¹⁴ existants fournissent des statistiques à ce sujet.

Enfin, il n'existe, à la connaissance de l'Arcep, pas d'observatoire permettant de vérifier la compatibilité de services particuliers (par ex. applications mobiles). Un tel observatoire pourrait néanmoins reposer, comme pour les contenus *web*, sur la nature – IPv4 ou IPv6 – des adresses IP publiées dans le DNS et associées aux serveurs utilisés par ces applications.

3.1.4 Intermédiaires techniques

Les intermédiaires techniques, notamment les transitaires, constituent un autre maillon central dans la connectivité des différents réseaux.

Une compatibilité IPv6 des FAI d'un côté et des fournisseurs de contenus de l'autre n'est donc pas suffisante à la généralisation d'IPv6 si les réseaux intermédiaires empruntés par le trafic ne sont pas en mesure d'acheminer ce type de trafic.

Une méthode répandue pour estimer le niveau des déploiements chez les transitaires consiste à analyser les routes empruntées par le trafic IPv6 depuis plusieurs points du réseau internet. Des observatoires exploitant des bases de données publiques¹⁵ regroupant de telles informations et issues de dispositifs indépendants permettent ainsi d'obtenir des indicateurs fiables sur le niveau de déploiement d'IPv6 chez les transitaires.

3.1.5 Equipements et terminaux

Les équipements réseaux et les terminaux utilisateurs qu'ils soient fixes ou mobiles constituent des éléments indispensables pour le bon fonctionnement de bout-en-bout du protocole IPv6.

Il n'existe, à la connaissance de l'Arcep, aucun observatoire public récurrent permettant d'évaluer la compatibilité des terminaux et des équipements réseau vendus en France ou dans le monde. L'Autorité a donc interrogé les équipementiers réseau majeurs, d'une part, et les opérateurs en tant que clients ou partenaires de ces derniers, d'autre part.

¹² Plusieurs acteurs fournissent des statistiques sur les audiences des sites web (Exemple : Alexa et Mediametrie).

¹³ Par exemple l'ANSSI et l'Afnic dans le cadre de l'[observatoire de la résilience de l'internet français](#).

¹⁴ Par exemple : <https://www.vyncke.org/ipv6status/detailed.php?country=fr>.

¹⁵ Exemple : <http://www.routeviews.org/>.

3.2 Etat des lieux du déploiement d'IPv6 en France

L'Arcep a recensé plusieurs observatoires publics fournissant des statistiques complémentaires sur l'état de déploiement d'IPv6 en France.

- L'Afnic et l'ANSSI publient conjointement et annuellement des statistiques sur le taux de pénétration d'IPv6 vu sous l'angle du DNS et du protocole de routage BGP ;
- Google et Akamai publient chacun la proportion d'utilisateurs de leurs services dotés d'adresses IPv6 ;
- Cisco, en partenariat avec l'Ecole Polytechnique, entretient un observatoire synthétique (6Lab) regroupant plusieurs indicateurs différents. Il utilise pour le constituer des données issues d'observatoires tiers et d'outils publics tels que :
 - Google ;
 - RIPE ;
 - APNIC Labs ;
 - Route Views ;
 - Etc.

Pour son état des lieux, l'Autorité a complété ces données publiquement accessibles par celles recueillies grâce à un questionnaire adressé aux acteurs.

3.2.1 Infrastructure de noms de domaine

L'Afnic estime que la part des serveurs DNS faisant autorité sur des domaines en « .fr » et compatibles IPv6 était, fin 2014, de l'ordre de **63 %**¹⁶.

Le taux de requêtes DNS reçues par les serveurs de l'Afnic sur un transport IPv6 est quant à lui plus faible et ne dépasse pas **18 %**. Ce niveau peu élevé résulte de la combinaison de plusieurs effets, parmi lesquels le faible nombre de contenus et de services accessibles en IPv6 et le nombre encore limité d'utilisateurs bénéficiant du protocole.

3.2.2 Fournisseurs d'accès à internet

Du point de vue d'un fournisseur de contenus tel que Google¹⁷, la proportion d'utilisateurs dotés d'adresses IPv6 situés sur le territoire français est, à la date de l'achèvement de ce rapport, de l'ordre de **10,5 %**.

¹⁶ <https://www.afnic.fr/fr/l-afnic-en-bref/actualites/actualites-generales/9337/show/l-observatoire-de-la-resilience-de-l-internet-francais-publie-son-rapport-2014.html>.

¹⁷ <https://www.google.fr/ipv6/statistics.html#tab=per-country-ipv6-adoption&tab=per-country-ipv6-adoption>.

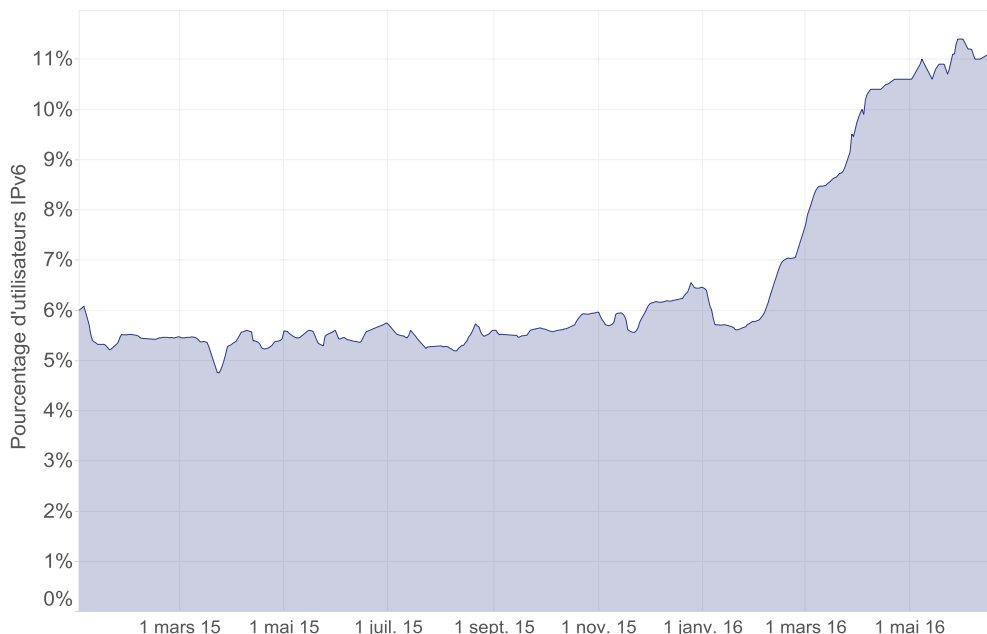


Figure 8 : Evolution du taux de pénétration d'IPv6 chez les utilisateurs en France depuis 2015
(Source : Cisco, d'après observatoire Google)

Sous l'effet du lancement (début 2016) des déploiements chez Orange, opérateur majeur en France¹⁸, pour ses clients fixes, cette proportion a doublé depuis la date de saisine du Gouvernement.

En utilisant la même méthode, Akamai¹⁹ estime quant à lui le ratio d'utilisateurs dotés d'adresses IPv6 en France **entre 10 et 12 %**.

3.2.3 Fournisseurs de services, contenus et applications

En s'appuyant sur les 500 sites web les plus visités par des utilisateurs situés sur le territoire français²⁰, Cisco estime la part de contenus en ligne disponible en IPv6 à **50 %**²¹ environ.

Cependant, des statistiques détaillées²² montrent que les sites web gouvernementaux à plus forte audience²³ ne sont pas accessibles en IPv6.

¹⁸ Orange a en effet annoncé le début des déploiements pour ses clients FttH et VDSL au premier trimestre 2016.

¹⁹ <https://www.stateoftheinternet.com/trends-visualizations-ipv6-adoption-ipv4-exhaustion-global-heat-map-network-country-growth-data.html>.

²⁰ <http://www.alexa.com/topsites/countries/FR>.

²¹ <http://6lab.cisco.com/stats/cible.php?country=FR&option=all>.

²² <https://www.vyncke.org/ipv6status/detailed.php?country=fr>.

²³ impots.gouv.fr, education.gouv.fr, legifrance.gouv.fr, interieur.gouv.fr, finances.gouv.fr, defense.gouv.fr et telecom.gouv.fr.

Il en va de même pour des sites web du service public, tels que celui de l'assurance maladie et celui de la caisse d'allocation familiale.

3.2.4 Intermédiaires techniques

Cisco, dans le cadre de son observatoire, estime le niveau de déploiement d'IPv6 dans les réseaux de transit sur la base des données recueillies par l'outil *Route Views* qui établit une cartographie du réseau internet en détaillant les routes et réseaux empruntés par le trafic IPv6 à partir de plusieurs points du réseau internet, notamment la France.

Ainsi, il estime la proportion de réseaux de transit compatibles IPv6 et auxquels ont recours les FAI et fournisseurs de contenus situés sur le territoire français à environ **70 %**.

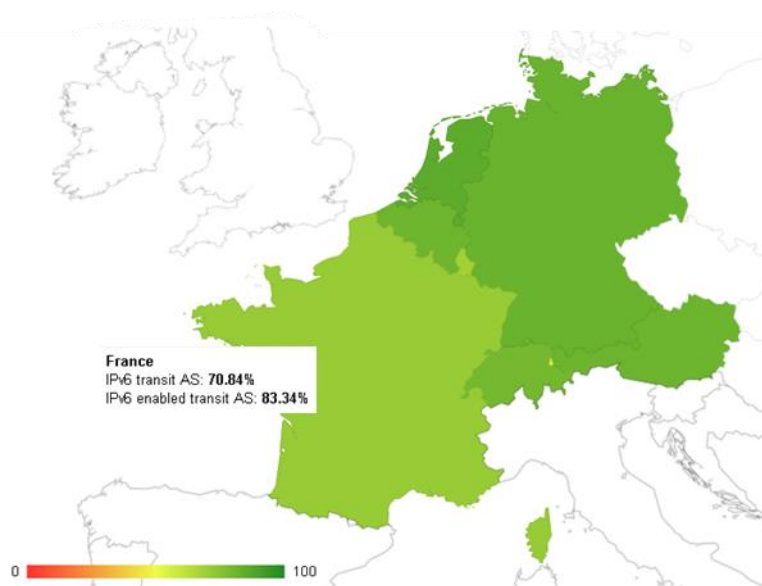


Figure 9 : Pénétration de l'IPv6 dans les réseaux de transit empruntés par le trafic issu d'utilisateurs situés en France (Source : Cisco)

Ce niveau de déploiement confirme les informations recueillies par l'Arcep au cours de ses rencontres avec les acteurs du secteur, c'est-à-dire que les réseaux de transport, qu'il s'agisse des cœurs de réseau des opérateurs ou des réseaux de transit, ont été parmi les premiers à déployer le protocole IPv6.

3.2.5 Equipements et terminaux

Sur la base des données recueillies dans le cadre de la préparation de ce rapport, il ressort que la **quasi-totalité** des équipements réseau actuellement commercialisés par les équipementiers majeurs sont compatibles IPv6 de manière native.

Selon les réponses obtenues par l'Arcep, il ressort également que les équipements plus anciens actuellement en parc peuvent généralement faire l'objet de mises à jour logicielles leur permettant de supporter ce protocole.

Concernant les terminaux à disposition des utilisateurs, l'Arcep note également que la **quasi-totalité** des terminaux fixes et mobiles récents sont compatibles IPv6. Il a cependant été porté à la connaissance de l'Autorité que plusieurs terminaux mobiles ne permettraient pas l'utilisation seule

du protocole IPv6, une adresse IPv4 étant toujours exigée. Cette contrainte, en ce qu'elle maintient une dépendance des FAI vis-à-vis des adresses IPv4, pourrait constituer à terme un frein à la migration de certains opérateurs mobiles.

Cependant, bien que ces restrictions ne soient pas encore toutes levées à ce jour, de récents développements laissent présager d'une évolution positive dans les prochains mois. A titre d'exemple, Apple exige désormais que toutes les applications mises à disposition sur son App Store soient en mesure d'assurer un fonctionnement purement IPv6²⁴ à partir du 1^{er} juin 2016.

3.3 Comparatif des niveaux de déploiement d'IPv6

Le tableau ci-dessous présente une synthèse des principaux indicateurs de déploiement de l'IPv6 en France.

Indicateur	Pénétration d'IPv6
Infrastructure DNS	63 % ²⁵
FAI	10 à 12 % ²⁶
Intermédiaires techniques	73 % ²⁷
Sites <i>web</i>	47 % ²⁸ dont 11% ²⁹ en « .fr »
Équipementiers	~100 % ³⁰

Tableau 1 : Taux de pénétration d'IPv6 chez les différentes catégories d'acteurs en France

Par ailleurs, au regard des réponses reçues au questionnaire adressé aux FAI, l'Arcep estime qu'à date, la part de trafic IPv6 chez un utilisateur final en *dual stack*³¹ en France est de l'ordre de **20 à 30 %** en moyenne.

A partir de certains de ces indicateurs, il est possible de positionner la France par rapport à d'autres pays.

	Espagne	Italie	Royaume-Uni	France	Etats-Unis	Allemagne	Belgique
FAI ³²	0,1 %	0,3 %	9,5 %	11 %	25 %	24 %	42 %
Sites <i>web</i> ³³	50 %	48 %	47 %	50 %	48 %	48 %	50 %
Intermédiaires ³⁴	70 %	75 %	79 %	73 %	65 %	84 %	82 %

Tableau 2 : Comparatif des niveaux de déploiement d'IPv6

²⁴ <https://developer.apple.com/news/?id=05042016a>.

²⁵ Rapport de l'Observatoire de la résilience de l'Internet français, 2015.

²⁶ Observatoire Google de l'IPv6, mai 2016.

²⁷ Observatoire 6Lab de Cisco, mai 2016.

²⁸ Observatoire 6Lab de Cisco, mai 2016.

²⁹ Rapport de l'Observatoire de la résilience de l'Internet français, 2015.

³⁰ Questionnaire Arcep, mars 2016.

³¹ I.e. disposant à la fois d'une adresse IPv4 et d'une autre IPv6.

³² Observatoire Google de l'IPv6, mai 2016.

³³ Observatoire 6Lab de Cisco, mai 2016.

³⁴ Observatoire 6Lab de Cisco, mai 2016.

Comme le montre le Tableau 2, la France est clairement engagée dans la transition et est en avance par rapport à certains pays comparables de l'espace économique européen tels que l'Espagne, l'Italie ou le Royaume-Uni. Elle a cependant connu au cours des dernières années une progression plus lente, notamment en ce qui concerne le déploiement par les FAI, qui la place aujourd'hui en retrait par rapport à des pays comme les Etats-Unis, l'Allemagne ou la Belgique.

Par ailleurs, il est important de noter que l'indicateur de déploiement d'IPv6 chez les fournisseurs de contenus ne traduit pas uniquement le contexte national puisque la plupart des fournisseurs de contenus et des sites web les plus populaires se caractérisent par leur portée mondiale. Un fournisseur de contenus qui déploie IPv6 a en effet tendance à le faire de manière simultanée pour tous les pays à partir desquels il est accessible. Une accélération des déploiements dans un pays donné peut donc également bénéficier à la France en ce qu'elle encourage les fournisseurs de contenus majeurs à s'engager dans la transition. Ceci explique le rapprochement des statistiques pour la France et les autres pays, qu'ils soient en avance ou en retard, en matière d'accessibilité à des contenus en IPv6. En revanche, comme expliqué en 3.2.3, une grande part des contenus purement nationaux, et donc destinés aux utilisateurs situés sur le territoire français, ne sont quant à eux pas encore accessibles en IPv6.

Le raisonnement est similaire en ce qui concerne les intermédiaires techniques et plus particulièrement les fournisseurs de transit. La plupart d'entre eux ont une activité qui s'étend au-delà des frontières nationales, ce qui explique la proximité des statistiques de la France avec d'autres pays.

De plus, l'Arcep constate que, parmi les pays en avance évoqués dans le Tableau 2, les contextes nationaux peuvent varier fortement. Par exemple, en Allemagne et aux Etats Unis, le déploiement d'IPv6 a essentiellement été porté par quelques FAI majeurs tels que Comcast ou Deutsche Telekom, fortement engagés dans la transition à leur propre initiative. En Belgique, à l'inverse, l'accélération de la transition résulte d'une démarche volontariste des pouvoirs publics.

Enfin, il convient de mettre en perspective l'écart constaté entre la France et les pays les plus avancés dans la transition, notamment en ce qui concerne le déploiement chez les FAI. En effet, bien que l'écart puisse sembler significatif, il convient de rappeler, comme indiqué en 3.2.2, que le taux de pénétration d'IPv6 chez les utilisateurs finals en France a plus que doublé entre février et mai 2016, à la suite des déploiements engagés par un des fournisseurs d'accès majeurs.

À court terme, on devrait donc assister à un rattrapage, à mesure que les autres FAI en France entameront leurs propres déploiements et que la transition s'étendra aux réseaux mobiles. D'après les informations communiquées à l'Arcep, ces déploiements devraient se généraliser en 2017.

3.4 Mise en place d'un observatoire national

A la suite de l'invitation en ce sens du Gouvernement, l'Arcep prévoit de mettre en place un observatoire national de la transition vers IPv6 en France. Celui-ci donnera lieu annuellement à la publication d'un rapport de synthèse soulignant les principaux progrès effectués et tentant d'identifier les éventuels points de blocages majeurs. Les résultats pourront également être présentés chaque année par l'Arcep lors de l'évènement qui pourrait être instauré par les pouvoirs publics (cf. section 5.3).

Comme expliqué dans ce rapport, le suivi du déploiement du protocole IPv6 ne peut se reposer sur un indicateur unique. Il doit au contraire, pour donner une vision globale de la situation, évaluer l'état des différents maillons de la chaîne technique internet.

L'Arcep observe également que plusieurs observatoires fiables, régulièrement mis à jour et instaurés par des acteurs publics ou privés existent.

Par conséquent, l'Autorité se propose, pour son propre observatoire, de réutiliser les publications existantes en les adaptant à la marge si nécessaire. Dans la mesure où ces observatoires ne couvrent pas l'ensemble des données et paramètres pertinents requis, ils seront complétés par des données recueillies par l'Arcep directement auprès des opérateurs. En l'occurrence, l'Arcep entend notamment rendre public, dans le cadre de cet observatoire, l'état d'avancement des plans de déploiements des principaux FAI en France.

3.5 Conclusion

L'Arcep estime, au vu des différents observatoires existants et des données recueillies à l'occasion de la préparation du présent rapport, qu'une réelle dynamique de transition s'est enclenchée en France. Tous les acteurs interrogés partagent le constat de la nécessité d'accélérer la transition vers IPv6 et certains d'entre eux semblent d'ores et déjà pleinement engagés dans cette transition. La transition planifiée à court terme par les principaux FAI en France devrait y contribuer significativement.

Cependant, cette transition ne s'achèvera que par la migration de l'ensemble des acteurs du numérique. Les mesures présentées en section 5 restent donc indispensables pour lever les dernières barrières et renforcer la dynamique de transition.

4 Coûts et risques liés à un retard dans la transition

Cette section présente les freins identifiés à la transition des acteurs et des utilisateurs du réseau internet vers le protocole IPv6 (4.1) ainsi que les risques et les conséquences néfastes liés à un retard important dans le déploiement et l'utilisation de ce protocole (4.2).

4.1 Freins à la transition

Au cours des entretiens conduits dans le cadre de la préparation du présent rapport, plusieurs freins à la transition vers IPv6 ont pu être identifiés. Ces derniers, après analyse, peuvent être classés en quatre catégories :

1. Le manque d'appétence pour IPv6, lié entre autre à l'absence de bénéfices commerciaux immédiats ;
2. L'absence de coordination entre les acteurs ;
3. Le manque de maîtrise et de maturité autour de ce nouveau protocole ;
4. Le maintien nécessaire en parallèle des réseaux IPv4.

4.1.1 Manque d'intérêt immédiat

Le manque d'appétence exprimé depuis plusieurs années pour le protocole IPv6 s'explique en premier lieu par des apports limités en matière de fonctionnalités par rapport à IPv4.

En effet, à ce jour, aucune nouvelle fonctionnalité ou application révolutionnaire (« *Killer application* ») n'a été identifiée par ses promoteurs. Ce constat est amplifié par le fait que la quasi-totalité des fonctionnalités initialement spécifiques à IPv6 (telles que le multicast ou certaines fonctions de sécurité) ont perdu de leur intérêt en étant gérées par des couches plus hautes, au niveau applicatif, ou encore progressivement rétro-portées sur IPv4 – cf. 2.3.1.

La majorité des acteurs consultés par l'Arcep, en particulier les FAI, s'accorde donc à dire que la transition vers IPv6 ne s'accompagnera pas à court terme d'opportunités commerciales particulières.

Par ailleurs, cette transition est imperceptible pour la plupart des internautes. En effet, ces derniers ne prêtent que rarement attention aux protocoles sous-jacents des réseaux ou des applications qu'ils utilisent. Cette absence de demande spécifique – et par conséquent d'opportunité sur le plan commercial – retarde les investissements nécessaires à la migration des réseaux et des services.

4.1.2 Absence de coordination entre les acteurs

Comme expliqué en 2.3.2, l'adoption du protocole IPv6 se fait de manière individuelle et décentralisée, par chaque acteur de la chaîne technique internet.

Pris individuellement, chaque acteur n'est incité à entamer la transition que si les autres acteurs avec qui il interagit s'y engagent à leur tour. Par exemple, un fournisseur d'accès à internet n'est incité à déployer IPv6 que si des contenus et des services sont disponibles en IPv6 et que les intermédiaires techniques auxquels il fait appel sont en mesure de prendre en charge ce type de trafic. La réciproque est également vraie pour chacun des autres acteurs. En effet, si un maillon de la chaîne fait défaut, un repli sur IPv4 sera nécessaire pour assurer l'acheminement du trafic.

Bien que certains acteurs tels que les FAI ont une responsabilité plus importante car ils contrôlent l'accès à l'utilisateur final, la transition ne peut se faire qu'en coordonnant l'ensemble des acteurs. Cette coordination est d'autant plus complexe qu'elle présente généralement une dimension internationale. Cependant, à l'échelle nationale, elle pourrait être facilitée par une meilleure visibilité sur les intentions des acteurs, notamment celles des plus importants d'entre eux.

4.1.3 Manque de maturité autour du protocole IPv6

Pour une grande majorité d'acteurs, le protocole IPv6 constitue une nouveauté à appréhender. Bien que sur le plan fonctionnel les différences avec le protocole IPv4 soient minimales, celles-ci entraînent une perte d'automatismes et une phase inévitable d'apprentissage et de montée en compétences. Quelques notions nouvelles telles que l'adressage public des terminaux ou encore la non

fragmentation des paquets³⁵ viennent également marquer un changement de paradigme quant à la gestion de certaines fonctions des réseaux.

Au cours des échanges conduits dans le cadre de la préparation de ce rapport, plusieurs acteurs ont ainsi souligné le manque de maturité autour de la mise en œuvre du protocole IPv6 : il se traduit par un manque de maîtrise pouvant conduire à des erreurs dans son utilisation ou dans sa mise en œuvre. Certaines de ces erreurs peuvent affecter par exemple le bon fonctionnement des services en ligne fournis par des FCA, les performances des réseaux des FAI (et des entreprises utilisatrices) ou leur intégrité – en les exposant à des failles de sécurité.

De plus, le niveau d'adoption faible d'IPv6 ne favorise pas un partage efficace de l'information, des expériences réussies et des bonnes pratiques à adopter au sein de la communauté internet en France.

Ce manque de maîtrise et de connaissance, ainsi que leurs potentielles répercussions sur le bon fonctionnement des réseaux publics et privés, constituent donc un frein psychologique important à la migration chez plusieurs acteurs. Ces freins peuvent également contribuer à répandre des idées reçues, souvent fausses, sur le manque de fiabilité du protocole IPv6, qui contribuent à leur tour à décourager d'autres acteurs d'engager la transition.

4.1.4 Maintien en parallèle des réseaux IPv4

Le déploiement des réseaux IPv6 se fera dans un premier temps en parallèle des réseaux IPv4 existants. En effet, comme expliqué plus haut, le protocole IPv4 continuera à acheminer une part importante du trafic tant que toute la chaîne technique sur internet ne sera pas en mesure d'acheminer ou de traiter les flux IPv6.

Sans date de fin prévisible, le maintien et l'exploitation à durée indéterminée de deux réseaux utilisant des protocoles différents représentent un certain niveau de complexité et des coûts supplémentaires qui pourraient freiner la transition vers IPv6 de plusieurs acteurs sur internet.

Pris individuellement, chacun aura en effet tendance à retarder ses propres déploiements, en espérant réduire au maximum, voire éviter, la période de recouvrement entre les deux protocoles.

4.2 Inconvénients liés à un retard

Un retard dans la transition vers IPv6 peut entraîner des conséquences fâcheuses pour le secteur.

Dans cette section sont présentés plusieurs inconvénients liés à un retard dans la transition vers IPv6. Certains de ces inconvénients se traduisent par des complexités techniques qui se font d'ores et déjà ressentir alors que d'autres soulèvent des questions d'innovation et de compétitivité à plus long terme.

³⁵ Contrairement à IPv4, la fragmentation* de paquets IPv6 (i.e. leur découpage en plusieurs paquets de taille inférieure) n'est permise qu'au niveau de la source qui les émet, les routeurs intermédiaires n'ayant plus cette faculté. Cela permet d'améliorer la performance du réseau en réduisant les traitements au niveau des routeurs intermédiaires.

Souvent, les inconvénients liés à une migration tardive ne sont pas partagés équitablement entre les différents acteurs sur internet ; certains peuvent subir une décision de maintien d'IPv4 prise par un acteur en aval ou en amont dans la chaîne technique.

4.2.1 Maintien de plus en plus complexe d'IPv4

Une des premières conséquences du retard dans la transition vers IPv6 s'exprime à travers les coûts cachés pour le maintien d'IPv4. En effet, afin de faire face à la pénurie, certains acteurs sont progressivement amenés à mettre en place des solutions telles que le CGN³⁶, permettant de réduire à court terme le besoin en IPv4 en partageant une unique adresse publique entre plusieurs utilisateurs.

Ces techniques présentent cependant plusieurs inconvénients. Hormis les coûts importants de mise en place et d'exploitation, celles-ci complexifient la gestion des réseaux. Elles mènent à un partage important des adresses IP publiques, dont les inconvénients sont décrits dans le RFC 6269.

Et cette complexité croît à mesure que la pénurie d'adresses IPv4 s'accroît. En effet, bien que la question ne soit pas encore d'actualité, ces solutions palliatives pourraient à leur tour rencontrer des limites.

À cette complexité vient s'ajouter celle liée aux conditions d'obtention des adresses IPv4 : en effet, dans le cadre de la gestion des derniers blocs restants, les registres régionaux appliquent des règles de rationnement de plus en plus sévères. Parallèlement s'est donc développé depuis plusieurs années un marché de la revente des adresses IPv4. Souvent, les transactions s'opèrent au travers de courtiers en charge de mettre en relation l'offre et la demande : les prix unitaires sont généralement de l'ordre de 10€ par adresse. Ce marché est également caractérisé par un fonctionnement opaque.

Ces conditions de plus en plus restrictives d'obtention d'adresses IPv4 peuvent entraver la bonne gestion et le développement d'un réseau mais également constituer une barrière à l'entrée de nouveaux acteurs et à l'émergence de nouveaux services, voire être à l'origine de pratiques d'éviction. En effet, bien que la transition vers IPv6 soit inévitable, l'obtention d'adresses IPv4 reste à court terme indispensable pour tout acteur souhaitant s'engager sans délai dans une nouvelle activité sur internet (exemple : hébergement) ou offrir des services en ligne. Cette dépendance vis-à-vis des adresses IPv4 perdurera tant qu'une majorité d'acteurs et d'utilisateurs n'aura pas opéré la transition vers IPv6.

4.2.2 Dysfonctionnement de certains services

Comme le soulignent plusieurs experts interrogés par l'Arcep, des solutions telles que le CGN peuvent entraver le fonctionnement de certains protocoles et donc de certains types de services sur internet³⁷. Par leurs choix et leur positionnement dans la chaîne technique, des acteurs ne souhaitant pas s'engager dans la transition vers IPv6 peuvent donc générer des externalités négatives sur d'autres maillons de la chaîne qui ne sont pas en mesure d'agir directement sur la cause du problème.

³⁶ *Carrier Grade NAT*, cf. section 2.2.2.

³⁷ Exemple : les applications pair-à-pair et certains modes de jeux en ligne.

A titre d'exemple, plusieurs éditeurs de services en ligne utilisant des protocoles pair-à-pair ont dû engager d'importants développements pour assurer le bon fonctionnement de leurs services sur des réseaux opérant des plateformes CGN. Plusieurs dysfonctionnements potentiels ont d'ailleurs été recensés par l'IETF dès 1994, qui, à l'époque, considérait déjà le NAT et ses dérivés comme des solutions inappropriées³⁸.

Plus récemment, certains fournisseurs de contenus ont démontré que l'utilisation d'IPv6, en contournant les plateformes intermédiaires de CGN, pourrait permettre d'améliorer significativement la performance des applications mobiles³⁹.

Au-delà de ces limitations recensées, ce type d'externalités est de nature à remettre en cause le modèle conceptuel fondateur des réseaux modernes : le modèle en couches. Selon ce modèle, les éditeurs d'applications et de solutions en ligne doivent être en mesure de développer leurs services en totale indépendance du fonctionnement des réseaux sous-jacents empruntés. C'est précisément ce mode de fonctionnement qui a permis le foisonnement et l'innovation qu'a connus l'internet depuis ses débuts.

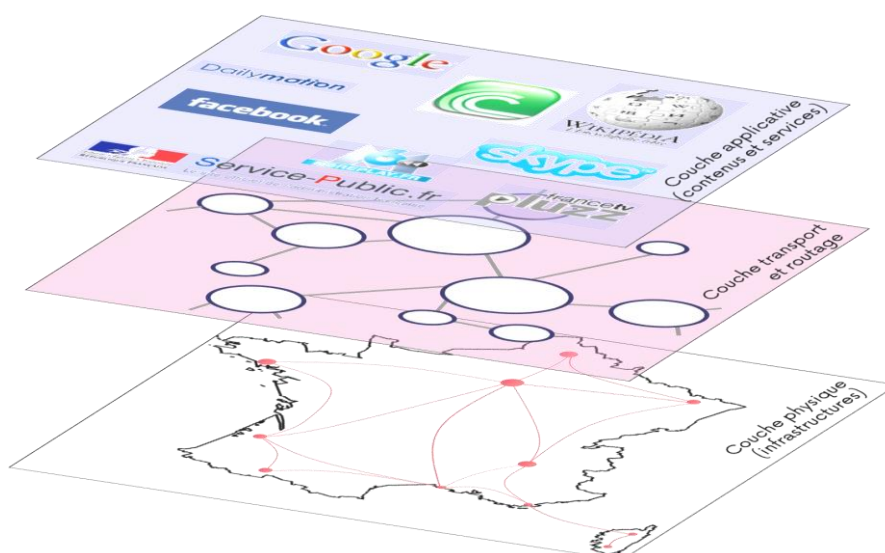


Figure 10 : Séparation des couches physiques, réseaux et applicatives dans les réseaux

4.2.3 Moindre résilience des réseaux

En regroupant plusieurs utilisateurs derrière les mêmes plateformes et les mêmes adresses IP, des solutions telles que le CGN peuvent fragiliser l'intégrité d'un réseau.

³⁸ RFC 1631 : "NAT has several negative characteristics that make it inappropriate as a long term solution, and may make it inappropriate even as a short term solution".

³⁹ <https://www.linkedin.com/pulse/ipv6-measurements-zaid-ali-kahn>.
https://www.nanog.org/sites/default/files/meetings/NANOG64/1033/20150602_Huston_The_Benefits_Of_v3.pdf.

En effet, la résilience d'internet provient avant tout de son architecture décentralisée. Ces solutions, qui créent des centres névralgiques au cœur des réseaux, introduisent des points uniques de défaillance⁴⁰ et donc des risques nouveaux sur le plan opérationnel.

4.2.4 Freins à l'innovation et perte en compétitivité

Bien qu'il n'y ait à ce jour, comme expliqué en 4.1.1, aucune application majeure à même d'accélérer le déploiement d'IPv6, la pénurie d'adresses IPv4 et un retard dans le déploiement d'IPv6 peuvent constituer à plus long terme une barrière à l'innovation, à l'émergence de nouveaux services ou encore à l'entrée de nouveaux acteurs. A titre d'exemple, le développement de l'internet des objets s'est à ce jour principalement effectué *via* des réseaux dédiés utilisant un protocole d'adressage privé qui ne repose pas sur IP : il n'est pas exclu que la pénurie d'adresses IPv4 l'explique en partie. IPv6 pourrait donc ouvrir à l'internet des objets de nouvelles opportunités d'architecture et d'adressage en IP – et les avantages associés. De même, par le nombre quasi-illimité d'adresses qu'il offre, le protocole IPv6 pourrait permettre un acheminement plus performant des flux vidéo ou encore l'adressage interne plus simple des centres de calculs de haute performance.

Par ailleurs, comme évoqué en 4.1, la transition vers IPv6 doit s'accompagner d'une montée en compétences pour bon nombre d'acteurs. Cette transition est inévitable et constitue une opportunité de croissance pour le secteur : bien que les usages actuels ne s'y prêtent pas encore, elle ouvrira la porte à un nouveau cycle d'innovations, de nouveaux produits et de nouveaux services.

Les pays en tête de cette transition développent progressivement une expertise et un savoir-faire qui contribuent à leur rayonnement et à leur reconnaissance dans la communauté numérique mondiale. A ce jour, cette notoriété se limite souvent au monde académique et à celui de la recherche, mais elle se propagera rapidement à celui de l'industrie et des services numériques à mesure que de nouvelles fonctionnalités et de nouveaux produits innovants verront le jour et deviendront accessibles aux utilisateurs.

Afin que le savoir-faire des acteurs du numérique français puisse s'imposer au-delà des frontières nationales il est donc indispensable que la France puisse retrouver sa place de leader en matière de déploiement et d'utilisation d'IPv6.

4.3 Conclusion

En conclusion et à la date d'achèvement du présent rapport, il apparaît que la complexité et les coûts croissants de gestion de la pénurie des adresses IPv4 constituent pour les acteurs le principal moteur de la transition vers IPv6, bien qu'ils soient difficilement quantifiables.

Le manque d'expérience en matière d'IPv6 et les difficultés que peuvent rencontrer les acteurs à se coordonner constituent quant à eux d'importants freins à la migration des utilisateurs et des acteurs du numérique. Les risques en matière de compétitivité, d'innovation et de résilience des réseaux en France plaident cependant pour une prise en main de cette problématique par les pouvoirs publics.

Des leviers permettant de lever ces freins et d'accélérer la transition sont présentés en section 5.

⁴⁰ *Single Point of failure* : se dit d'un élément dont la panne peut entraîner un dysfonctionnement de la totalité ou d'une grande partie du réseau.

5 Leviers permettant d'encourager la transition

Au vu des freins et des risques identifiés précédemment, cette section présente plusieurs leviers permettant au Gouvernement d'encourager la transition vers IPv6 :

	Montrer l'exemple
1	<i>en s'engageant dans des délais ambitieux à rendre accessibles en IPv6 tous les sites web et services en ligne de l'État</i>
	Généraliser l'enseignement d'IPv6
2	<i>aussi bien dans les formations initiales que continues, afin de lever, par la pédagogie, les freins à l'adoption du protocole IPv6.</i>
	Mettre en place les espaces d'échanges adéquats pour la communauté
3	<i>afin de fédérer la communauté et de permettre un échange sur les bonnes pratiques et les expériences individuelles</i>
	Améliorer la coordination entre parties prenantes
4	<i>en rendant publiques les intentions de court et moyen termes des acteurs majeurs de la transition.</i>
	Mieux informer l'utilisateur
5	<i>notamment sur la pérennité des terminaux dont il dispose et les possibles dysfonctionnements liés aux mécanismes de rationnement des adresses IPv4</i>
	Préparer la fin d'IPv4
6	<i>en permettant, à terme, aux acteurs qui souhaitent rationaliser la gestion de leurs réseaux de pouvoir se passer définitivement du protocole IPv4.</i>

La plupart de ces leviers reposent sur un mode d'action indirect et visent à rassurer les acteurs quant à leurs investissements et, ce faisant, à accélérer la transition.

L'Etat peut quant à lui se positionner comme catalyseur sur ce sujet puisqu'il joue à la fois un rôle de garant du bon fonctionnement du secteur, mais également celui de grand utilisateur public du réseau internet.

5.1 Montrer l'exemple

Tout d'abord, en tant qu'utilisateur du réseau internet, l'Etat peut s'engager à montrer l'exemple et s'imposer comme un des promoteurs d'IPv6 en France.

Dès 2011, une circulaire à destination des administrations de l'Etat, relayée auprès des collectivités territoriales, a encouragé la prise en compte de la compatibilité IPv6 dans les spécifications techniques des cahiers des charges des marchés publics portant sur des biens ou services utilisant le protocole IP. Elle prévoyait également que les services de l'Etat assurent progressivement une compatibilité de leurs sites et services en ligne au protocole IPv6.

Les acteurs rencontrés au cours de la préparation du présent rapport confirment pour la plupart la présence de cette exigence dans les appels d'offres publics relatifs aux services de connectivité.

Afin d’aller plus loin dans la promotion d’IPv6, l’Etat et les administrations concernées pourraient désormais également s’engager, dans des délais ambitieux, à rendre l’ensemble des sites web et des services en ligne à destination du public accessibles aussi bien en IPv4 qu’en IPv6.

Par sa dimension symbolique, cette mesure confirmerait l’engagement de l’Etat et son soutien à la transition qui s’impose au secteur. Elle contribuerait également, par sa dimension pratique, à l’accélérer en venant enrichir le catalogue d’offres et des services accessibles en IPv6.

5.2 Généraliser l’enseignement d’IPv6

Comme expliqué en 4.1, un des freins à l’adoption d’IPv6 réside dans le manque de connaissance et de maîtrise de ce protocole et, par conséquent, dans les risques perçus dans la migration.

Afin que le déploiement d’IPv6 puisse se généraliser et se pérenniser en France, il est donc important que les acteurs du secteur puissent se former et monter en compétence sur ce nouveau protocole et les spécificités qu’il apporte.

Plusieurs programmes pédagogiques⁴¹ sont apparus au cours de ces dernières années, permettant de comprendre le protocole IPv6 et sa mise en œuvre. Bien que ces programmes soient efficaces et ouverts à tous, il est important que ce qui apparaît aujourd’hui comme une première série d’initiatives isolées puisse s’inscrire dans une logique plus globale et dans une volonté nationale permettant aux acteurs d’appréhender sereinement la transition.

Par ailleurs, s’agissant de la formation continue, il est indispensable que des programmes certifiants, attestant de l’aptitude des diplômés, puissent voir le jour. La valeur délivrée par de tels certificats encouragera aussi bien les employés que les employeurs à recourir à ces formations.

Enfin, en ce qui concerne les formations initiales, IPv6 devra progressivement devenir la base des programmes d’enseignement dans les cursus pertinents, là où IPv4 occupe encore aujourd’hui une place prépondérante, aussi bien dans les enseignements théoriques que pratiques.

L’ensemble permettra de faire disparaître, par la pédagogie, certaines idées reçues préjudiciables à l’adoption d’IPv6.

5.3 Mettre en place les espaces d’échanges adéquats

La levée de l’inertie dans le déploiement d’IPv6 peut passer par une meilleure communication sur le sujet au sein de la communauté du numérique en France.

En effet, comme expliqué en 4.1, les acteurs, pris individuellement, ne sont incités à engager la transition que si les autres catégories d’acteurs avec qui ils interagissent s’engagent également. Or, l’Arcep a constaté au cours de ses entretiens que plusieurs initiatives étaient en œuvre en matière de déploiement d’IPv6 sur le plan national. Celles-ci restent cependant souvent méconnues au sein de la communauté internet.

⁴¹ A titre d’exemple <https://www.fun-mooc.fr/courses/MinesTelecom/04012S02/session02/about>.

Ces informations pouvant être considérées d'intérêt public, une transparence accrue sur les intentions de déploiement des acteurs pourrait contribuer à accélérer la transition vers IPv6. Elles permettraient en effet de rassurer individuellement les acteurs quant à l'utilité et la pérennité de leurs propres déploiements.

Afin d'atteindre cet objectif, l'Etat, en tant que garant du bon fonctionnement durable du secteur, peut s'engager à mettre en place les espaces d'échange adéquats pour la communauté du numérique en France ou à soutenir des initiatives existantes, afin de leur donner une visibilité et donc une portée plus large.

Cela pourrait se traduire par des événements organisés annuellement et traitant du sujet au travers d'interventions et de divers ateliers, visant à fédérer la communauté internet autour de la transition vers IPv6. Ces initiatives donneraient aux parties prenantes l'occasion d'échanger sur leurs expériences individuelles et de partager sur les nouveautés et les bonnes pratiques à adopter. Ces événements pourraient viser aussi bien les décideurs (format plénier) des différents acteurs, afin de les sensibiliser à la question, que les personnes directement impliquées dans le déploiement et la gestion des réseaux (format technique, sous forme d'ateliers pratiques par exemple) afin d'apporter des réponses concrètes à leurs préoccupations. Pour plus d'efficacité, ils devraient réunir l'ensemble des parties prenantes à la transition vers IPv6 (cf. *supra*).

L'observatoire que l'Arcep entend mettre en place à la suite de l'invitation en ce sens du Gouvernement (cf. section 3.4) contribuera à cet effort d'échange et de transparence.

5.4 Améliorer la coordination entre parties prenantes

Au-delà de l'échange d'expérience et de bonnes pratiques, une bonne visibilité sur les intentions de court et moyen termes de chacun est indispensable pour permettre le bon déroulement de la transition vers IPv6.

Bien que des considérations internationales entrent en ligne de compte, un effort particulier de transparence de la part des acteurs en France peut contribuer à rattraper le retard pris sur les pays les plus en avance dans la transition.

Cette transparence pourrait se traduire par l'obligation pour chaque acteur majeur de la chaîne technique de remettre à l'Arcep – ou à toute autre institution désignée – un rapport dressant l'état des lieux précis de mise en œuvre du protocole IPv6 dans son réseau ainsi que sa feuille de route de déploiement à horizon 1, 3 et 5 ans.

Dans la mesure où, comme expliqué en 4.1.2, certains acteurs jouent un rôle plus crucial que d'autres dans cette transition, ces dispositions pourraient se limiter, dans un premier temps, aux FAI dont le parc cumulé fixe et mobile excède un million de clients.

Les éléments d'informations considérés comme présentant une utilité générale pourront par la suite faire l'objet d'une communication au public par l'Arcep – ou par toute autre institution désignée pour cette mission.

5.5 Mieux informer l'utilisateur

Dans la mesure où le protocole IPv6 a vocation à devenir la norme et où les contraintes liées à la pénurie d'adresses IPv4 tendent à s'accroître, il convient d'assurer une bonne information des utilisateurs tout au long du processus de transition.

Ainsi, le législateur pourrait imposer à tout professionnel commercialisant des terminaux ou périphériques destinés à utiliser le réseau internet de satisfaire à l'obligation d'information sur la norme d'adressage utilisable. Les informations communiquées devraient en particulier inclure la compatibilité ou la non compatibilité de l'équipement avec le protocole IPv6. De telles mesures de transparence viseraient à éclairer le consommateur sur la pérennité des terminaux et équipements disponibles sur le marché.

De même, l'obligation d'informer sur le nombre d'utilisateurs susceptibles de partager la même adresse IP publique pourrait être imposée aux FAI, dans le cas où un adressage partagé est mis en œuvre au niveau du réseau. Ces informations permettront aux utilisateurs, au moment de souscrire à l'offre souhaitée, de tenir compte des potentielles limitations techniques que ces mécanismes de rationnement peuvent induire.

5.6 Préparer la fin d'IPv4

Bien que le déploiement d'IPv6 soit inéluctable, celui-ci se fera en parallèle des réseaux IPv4, qui continueront dans un premier temps à acheminer une part importante du trafic. L'inversion du rapport de force entre les deux protocoles se fera progressivement, au fil des déploiements et de la mise à disposition de contenus et de services en IPv6.

A terme, il n'est pas exclu qu'un trafic IPv4 résiduel provenant d'acteurs ayant pris du retard dans la transition oblige des acteurs tiers à maintenir contre leur gré le protocole IPv4 et ce, pour une durée indéterminée.

Si, compte-tenu de la dynamique enclenchée, des mesures contraignantes apparaissent inadaptées à court ou moyen terme, il pourrait être envisagé que, passé un certain seuil dans la transition, des dispositions spécifiques, de nature réglementaire ou législative, permettent aux acteurs qui souhaitent pouvoir se passer définitivement du protocole IPv4, d'être en mesure de le faire, sans compromis sur leur connectivité. Celles-ci pourraient par exemple se traduire, pour l'ensemble des acteurs de la chaîne technique, par une obligation d'utilisation du protocole IPv6 (assortie d'un délai de mise en œuvre suffisant, correspondant idéalement à la durée de renouvellement de leurs équipements et logiciels associés) et par une autorisation de ne plus assurer la connectivité IPv4 – afin de rationaliser les réseaux en faveur du seul protocole IPv6.

Le seuil en question ainsi que la nature de telles dispositions devront évidemment faire l'objet, le cas échéant, d'une importante concertation entre le secteur et les pouvoirs publics. Un délai de préavis suffisant devra également être prévu. Leur opportunité devra également être établie au cas par cas, le moment venu.

Enfin, le caractère supranational des considérations et des enjeux plaide pour une prise en main de la problématique à une échelle *a minima* européenne par les autorités compétentes.

5.7 Conclusion

En conclusion, il apparaît que l'Etat peut dans un premier temps accompagner et dynamiser cette transition, au travers d'actions simples et indirectes. Cela passe par une généralisation de l'enseignement d'IPv6 dans les formations initiales et continues ainsi que la création des espaces d'échanges permettant de disséminer l'information sur le sujet et de fédérer une communauté autour de cette transition.

Parallèlement, et en tant qu'utilisateur, l'Etat peut s'engager à promouvoir plus activement l'utilisation d'IPv6 en assurant la compatibilité de ses sites *web*, services et infrastructures réseau.

Des mesures législatives ou réglementaires pourraient également être envisagées. Elles pourraient par exemple venir, dans un premier temps, imposer la transparence sur les intentions des acteurs majeurs de la transition, quant à la compatibilité IPv6 des terminaux et périphériques ou quant au partage éventuel d'adresses IP publiques puis, à plus long terme, garantir aux acteurs qui se sont engagés dans cette transition de ne pas dépendre indéfiniment du protocole IPv4.

6 Conclusion générale

La transition vers le protocole IPv6, successeur d'IPv4, constitue l'évolution du protocole IP la plus importante depuis la création d'internet. Face à l'épuisement des ressources d'adressage IPv4, cette transition semble aujourd'hui inévitable.

Les enjeux ne sont pas uniquement d'ordre technique. En effet, il en va de la préservation du foisonnement qui a contribué au succès d'internet dès ses débuts et, plus généralement, de la préservation d'un internet ouvert, pérenne, innovant et résilient.

La France, pionnière dans cette transition, a connu au cours des dernières années une progression ralentie qui a permis à un peloton de tête constitué de pays tels que l'Allemagne, la Belgique ou encore les Etats Unis de la distancer provisoirement. Si une dynamique de transition semble désormais enclenchée en France, il est important de veiller à son soutien, de manière à ce qu'une trop forte inertie n'entraîne pas un retard de nature à nuire à l'écosystème numérique national. Pour ce faire, des actions simples peuvent être envisagées pour encourager cette transition, qui dépend en premier lieu de la bonne coordination de l'ensemble des acteurs de la chaîne technique.

En tant que garant du bon fonctionnement du secteur, l'Etat peut jouer un rôle central en créant un environnement propice à l'accélération de ce mouvement de transition.

En premier lieu, afin de pallier le manque de maîtrise d'IPv6, il est indispensable de généraliser l'enseignement de ce protocole aussi bien dans les formations initiales que continues. Une telle initiative contribuera à faire disparaître certaines idées reçues préjudiciables au déploiement d'IPv6.

Ensuite, l'Etat pourrait encourager la mise en place d'espaces d'échanges récurrents permettant aux différents intervenants d'exposer leurs réalisations et leurs projets à la communauté. Au-delà du partage d'expérience, cette pratique permettrait une meilleure coordination des différentes catégories d'acteurs en leur apportant de la visibilité sur chacun des maillons de la chaîne technique.

L'Arcep entend en outre mettre en place, comme l'y invite le Gouvernement, un observatoire des déploiements s'inscrivant dans cette démarche. Un tel observatoire permettra, de manière récurrente, de dresser l'état des lieux du déploiement du protocole IPv6 en France, de contribuer à la transparence sur les intentions des acteurs majeurs et d'identifier d'éventuelles sources de blocages.

Par ailleurs, en tant qu'utilisateur du réseau internet et par conséquent du protocole IPv6, l'Etat pourrait donner l'exemple en s'engageant, dans des délais ambitieux, à rendre tous ses services en ligne compatibles et accessibles en IPv6.

Enfin, il convient de noter que le protocole IPv4 continuera d'être employé à court et à moyen terme. Au fur et à mesure du déploiement d'IPv6, le maintien et l'exploitation parallèle des deux technologies entraînera une charge supplémentaire pour tous les acteurs impliqués. Il apparaît donc raisonnable qu'au-delà d'un certain seuil de déploiement d'IPv6, des mesures législatives ou réglementaires viennent restreindre la période de recouvrement et ainsi permettre aux acteurs qui le souhaitent de s'affranchir totalement du protocole IPv4. Au préalable, d'autres mesures pourront venir imposer la transparence sur les intentions des acteurs majeurs de la transition, quant à la compatibilité IPv6 des terminaux et périphériques ou quant au partage éventuel d'adresses IP publiques entre plusieurs utilisateurs. Ces mesures, si leur opportunité est établie, devront être annoncées suffisamment à l'avance et faire l'objet d'une concertation la plus large possible.

Glossaire

Bit

Cf. octet.

CGN (NAT à l'échelle de l'opérateur)

Le *Carrier Grade Nat* correspond à la reproduction du mécanisme de NAT à une échelle plus grande : celle du réseau de l'opérateur. Les *box* des utilisateurs sont, à leur tour, placées derrière des NAT et partagent donc entre elles une ou plusieurs adresses publiques visibles depuis le reste du réseau internet.

DNS

Le *Domain Name System* (système de noms de domaine) est un service permettant de traduire un nom de domaine (exemple www.arcep.fr) en l'adresse IP de la machine portant ce nom. Ce protocole est indispensable au fonctionnement du réseau internet.

Fragmentation / non fragmentation

En IPv6, la non fragmentation est un principe qui s'oppose à une pratique répandue sur les réseaux IPv4. Sur ces derniers, les nœuds intermédiaires du réseau peuvent décider de fragmenter (découper) les paquets IP jugés de taille trop importante avant de poursuivre leur acheminement.

En IPv6, la taille des paquets est déterminée une fois pour toutes par la source et n'est pas ajustable par les nœuds intermédiaires.

Internet Engineering Task Force (IETF, <http://www.ietf.org/>)

L'IETF est un groupe international d'experts, informel et ouvert, qui contribue à l'élaboration des standards utilisés sur internet. Il est constitué de plusieurs groupes de travail et de discussion qui traitent de plusieurs sujets ayant trait au fonctionnement d'internet.

IPsec

L'*Internet Protocol Security* désigne un ensemble de protocoles utilisant des algorithmes permettant le transport de données sécurisées sur un réseau IP. Contrairement aux standards traditionnels qui opèrent sur la couche applicative, celui-ci opère sur la couche réseau (IP), ce qui le rend indépendant des applications utilisées. Son objectif est d'authentifier et/ou de chiffrer les données entre deux nœuds du réseau IP.

IPv4

IPv4 (Internet Protocol version 4) est la première version du protocole IP (Internet Protocol) à avoir été largement déployée, et sur laquelle repose encore en 2015 la majorité des communications sur internet. Elle définit le format d'adressage du même nom. Une adresse IPv4 est représentée sous la forme de quatre nombres décimaux séparés par des points comme 192.0.2.25. Chacun des nombres représente un octet (8 bits) qui permet de représenter 256 valeurs différentes. L'espace IPv4 s'étend donc théoriquement de 0.0.0.0 à 255.255.255.255. Il est néanmoins à noter que certaines plages d'adresses ont été réservées pour des usages spécifiques (par ex. le *multicast* ou le *loopback*) et qu'il

existe en outre des contraintes techniques empêchant l'utilisation normale de certaines adresses (par ex. celles qui se trouvent aux extrémités, après découpage en sous-réseaux locaux).

IPv4 est décrit dans le RFC 791 de septembre 1981.

IPv6

IPv6 (Internet Protocol version 6) est le successeur d'IPv4. Les adresses IPv6 sont constituées de 16 octets au lieu de 4, ce qui permet un espace d'adressage bien plus important qu'avec IPv4. Les adresses IPv6 sont représentées comme une concaténation de 8 mots hexadécimaux séparés par des caractères « : » (par ex. 2001:db8:0:85a3::ac1f:8001).

IPv6 est décrit dans le RFC 2460 de décembre 1998.

NAT (traduction d'adresses réseau)

Le *Network Address Translation* correspond, dans un réseau informatique, à la fonction qui permet de faire correspondre à un ensemble d'adresses IP internes (généralement des adresses privées), un ensemble d'adresses publiques. Ce mécanisme permet notamment de faire correspondre une seule adresse externe publique visible sur internet à toutes les adresses d'un réseau privé : il permet de pallier temporairement l'épuisement des adresses IPv4. Au sein d'un foyer, cette fonction est généralement assurée par le modem fourni par le fournisseur d'accès (la *box*).

Octet

Un octet est un groupe de 8 bits codant une information (nombre, caractère, etc.). Le bit, quant à lui, est l'unité la plus simple dans un système de numération binaire, ne pouvant prendre que deux valeurs, désignées le plus souvent par les chiffres 0 et 1.

Un octet permet donc de représenter 2^8 , soit 256, valeurs différentes.

Registre Internet Local (LIR)

Un Registre Internet Local (LIR) est un organisme qui a reçu une allocation d'adresses IP d'un registre internet régional (RIR), en vue d'attribuer ces adresses à des tiers (en général, ses clients) ou pour ses besoins propres. Un LIR est généralement un opérateur IP ou une grande entreprise souhaitant gérer elle-même son adressage réseau.

Les LIR sont membres du RIR de leur région.

Registre Internet Régional (RIR)

Un Registre Internet Régional (RIR) est un organisme en charge, notamment, de l'allocation de blocs d'adresses IP (IPv4 et IPv6) aux acteurs d'une région géographique donnée (échelle continentale).

La gestion des blocs de sa responsabilité lui a été déléguée par l'IANA, qui constitue l'autorité centrale à l'échelle mondiale.

Il existe 5 registres régionaux : AfriNIC (pour le continent africain), APNIC (pour l'Asie Pacifique), ARIN (pour l'Amérique du nord), LACNIC (pour l'Amérique latine et les caraïbes), RIPE-NCC (pour l'Europe, le Moyen-Orient et quelques pays d'Asie centrale).