

MOOC


Objectif IPv6 !

vers l'internet nouvelle génération

Document Compagnon

Séquence 4

L'integration d'IPv6 dans l'Internet

Le contenu de ce document d'accompagnement du MOOC IPv6 est publié sous
Licence Creative Commons **CC BY-SA 4.0 International**. 

Licence Creative Commons CC BY-SA 4.0 International



Attribution - Partage dans les Mêmes Conditions 4.0 International (CC BY-SA 4.0)

Avertissement Ce résumé n'indique que certaines des dispositions clé de la licence. Ce n'est pas une licence, il n'a pas de valeur juridique. Vous devez lire attentivement tous les termes et conditions de la licence avant d'utiliser le matériel licencié.

Creative Commons n'est pas un cabinet d'avocat et n'est pas un service de conseil juridique. Distribuer, afficher et faire un lien vers le résumé ou la licence ne constitue pas une relation client-avocat ou tout autre type de relation entre vous et Creative Commons.

Clause C'est un résumé (et non pas un substitut) de la licence.

<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode>

Vous êtes autorisé à :

- **Partager** — copier, distribuer et communiquer le matériel par tous moyens et sous tous formats
- **Adapter** — remixer, transformer et créer à partir du matériel
- pour toute utilisation, y compris commerciale.

L'Offrant ne peut retirer les autorisations concédées par la licence tant que vous appliquez les termes de cette licence.

Selon les conditions suivantes :

Attribution — You must give **appropriate credit**, provide a link to the license, and **indicate if changes were made**. You may do so in any reasonable manner, but not in any way that suggests the licensor endorses you or your use.

Partage dans les Mêmes Conditions — Dans le cas où vous effectuez un remix, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'Oeuvre originale, vous devez diffuser l'Oeuvre modifiée dans les même conditions, c'est à dire avec **la même licence** avec laquelle l'Oeuvre originale a été diffusée.

No additional restrictions — Vous n'êtes pas autorisé à appliquer des conditions légales ou des **mesures techniques** qui restreindraient légalement autrui à utiliser l'Oeuvre dans les conditions décrites par la licence.

Notes: Vous n'êtes pas dans l'obligation de respecter la licence pour les éléments ou matériel appartenant au domaine public ou dans le cas où l'utilisation que vous souhaitez faire est couverte par une **exception**.

Aucune garantie n'est donnée. Il se peut que la licence ne vous donne pas toutes les permissions nécessaires pour votre utilisation. Par exemple, certains droits comme **les droits moraux, le droit des données personnelles et le droit à l'image** sont susceptibles de limiter votre utilisation.

Les informations détaillées sont disponibles aux URL suivantes :

- <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.fr>
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Creative_Commons

Les auteurs



Bruno Stévant

Bruno STEVANT est enseignant chercheur à l'IMT Atlantique. Il intervient dans l'enseignement et sur les projets de recherche autour d'IPv6 depuis plus de 10 ans. Il est secrétaire et responsable des activités de formation de l'association G6, association pour la promotion et le déploiement d'IPv6 en France.



Jacques Landru

Enseignant chercheur au CERI - Systèmes Numériques à l'IMT Nord Europe, Jacques est responsable de l'UV de spécialisation ARES (Architecture des RESeaux) à la fois dans le mode traditionnel présentiel que dans sa déclinaison à distance dans le cadre de la filière apprentissage.



Jean-Pierre Rioual

Ingénieur Conseil Réseaux – EURÊKOM. Fort de 30 années d'expérience dans le domaine des réseaux, il intervient auprès des entreprises pour des missions d'expertise sur leurs réseaux de transmission de données (intégration, mesures, optimisation, administration), conçoit et anime des actions de formation "réseaux".



Véronique Vèque

Véronique Vèque est Professeur des Universités à l'Université Paris-Saclay. Elle enseigne les réseaux depuis plus de 20 ans en Master Réseaux et Télécoms. Elle poursuit ses recherches au sein du L2S (Laboratoire des Signaux et Systèmes) où elle est responsable de l'équipe Réseaux, optimisation et codage. Elle est directrice-adjointe de l'école doctorale STIC de l'Université Paris-Saclay.



Pascal Anelli

Pascal ANELLI est enseignant-chercheur à l'Université de la Réunion. Il enseigne les réseaux depuis plus de 20 ans. Il est membre du G6 depuis sa création. A ce titre, il est un des contributeurs du livre IPv6. En 1996, il a participé au développement d'une version de la pile IPv6 pour Linux.

Remerciements à :

- Vincent Lerouvillois, pour son travail de relecture attentive ;
- Joël GROUFFAUD (IUT de la Réunion) ;
- Pierre Ugo TOURNoux (Université de la Réunion) ;
- Bruno Di Gennaro (Association G6) ;
- Bruno Joachim (Association G6) pour sa contribution à l'activité « Contrôler la configuration réseau par DHCPv6 » ;
- Richard Lorion (Université de la Réunion) pour sa contribution à l'activité « Etablir la connectivité IPv6 tunnels pour IPv6 ».

----- oOo -----

Tables des activités

| | |
|---|-----------|
| Les auteurs..... | 5 |
| Activité 40 : Déployer IPv6 maintenant..... | 9 |
| Introduction..... | 9 |
| Motivations pour IPv6..... | 10 |
| Les contraintes du déploiement d'IPv6..... | 11 |
| Principes des mécanismes d'intégration..... | 12 |
| Double pile..... | 12 |
| Tunnel..... | 13 |
| Traduction..... | 13 |
| Quel scénario pour le déploiement ?..... | 15 |
| Conclusion..... | 17 |
| Références bibliographiques..... | 18 |
| Pour aller plus loin..... | 18 |
| Activité 41 : Communiquer en double pile..... | 21 |
| Introduction..... | 21 |
| Technique de la double pile..... | 21 |
| Étude et préparation du déploiement d'IPv6..... | 22 |
| Méthode..... | 22 |
| Vérification de la disponibilité d'IPv6..... | 25 |
| Obtenir un préfixe IPv6..... | 26 |
| Préfixe ULA..... | 26 |
| Préfixe GUA..... | 28 |
| Définition du plan d'adressage de sous-réseau avec IPv6..... | 29 |
| Déploiement des équipements en double pile..... | 30 |
| Configuration d'adresses..... | 31 |
| Résolution d'adresses..... | 31 |
| Administration du réseau..... | 32 |
| Déploiement d'IPv6 pour les services..... | 32 |
| Les adresses IPv4 imbriquées dans une adresse IPv6..... | 32 |
| Au niveau des applications..... | 33 |
| Problèmes liés au déploiement d'IPv6..... | 34 |
| Conclusion..... | 38 |
| Références bibliographiques..... | 38 |
| Pour aller plus loin..... | 39 |
| Activité 42 : Établir la connectivité en IPv6..... | 41 |
| Problématique..... | 41 |
| Principe du tunnel IPv6 sur IPv4..... | 41 |
| Tunnel configuré..... | 43 |
| Connectivité d'un site isolé : <i>Tunnel Broker</i> | 44 |
| Tunnel automatique..... | 46 |
| Connectivité sur une infrastructure IPv4 : <i>6rd</i> | 48 |
| Conclusion..... | 51 |
| Références bibliographiques..... | 52 |
| Pour aller plus loin..... | 52 |
| Activité 43 : Interopérer les applications par traduction..... | 53 |
| Contexte d'utilisation de la traduction..... | 53 |
| Principe de la traduction entre protocoles IP..... | 54 |

| | |
|---|-----------|
| Transposition protocolaire des champs de l'en-tête (RFC 7915)..... | 55 |
| Les adresses pour les traducteurs d'adresse NAT64 (RFC 6052)..... | 56 |
| Traduction des adresses..... | 57 |
| Mécanismes complémentaires..... | 59 |
| Traduction des paquets ICMP..... | 59 |
| Relais-traducteur DNS auxiliaire (RFC 6147)..... | 60 |
| Mécanisme de transition NAT64/DNS64..... | 62 |
| NAT64 : traduction "sans état" RFC 7915..... | 62 |
| NAT64 : traduction "avec état" RFC 6146..... | 63 |
| Conclusion..... | 65 |
| Références bibliographiques..... | 66 |
| Pour aller plus loin..... | 66 |
| Activité 44 : Interopérer des applications par passerelles applicatives..... | 69 |
| Contexte d'utilisation des passerelles applicatives..... | 69 |
| Principe des passerelles applicatives..... | 69 |
| Cas du service Web..... | 70 |
| ALG placée du côté du client..... | 71 |
| ALG placée du côté du service..... | 71 |
| Déploiement d'un relais inverse..... | 72 |
| Utilisation d'un service d'hébergement ou de distribution des contenus..... | 73 |
| Conclusion..... | 74 |
| Pour aller plus loin..... | 75 |
| Conclusion..... | 77 |
| Références bibliographiques..... | 78 |
| Pour en savoir plus..... | 78 |
| Remerciements..... | 78 |

Activité 40 : Déployer IPv6 maintenant

Introduction

Généralement, l'identification d'une *killer application* est recherchée pour justifier un passage rapide vers IPv6. Ce fut le cas avec IPv4 quand le Web est apparu. Les sites sont massivement passés de protocoles propriétaires (IPX, NetBEUI) vers IPv4 pour accéder aux informations par un navigateur ; ce qui a conduit au concept d'intranet. On ne connaît pas actuellement d'application particulière pouvant forcer massivement le passage vers IPv6. Les fonctionnalités avec IPv4 sont les mêmes, puisqu'il ne s'agit que d'une nouvelle version du protocole IP. La qualité de service est souvent évoquée, mais il s'agit d'un leurre, car les mécanismes de réservation ou de différenciation sont pris en charge par les deux versions du protocole. Il n'y a pas une fonctionnalité qu'aurait IPv6 qui ne soit pas dans IPv4. Il peut y avoir des simplifications apportées, comme dans la configuration d'un réseau. Mais ce genre d'avantage ne justifie pas le coût de la migration d'IPv4 vers IPv6. Les raisons poussant au passage à IPv6 ne sont pas à chercher du côté de la demande mais trouvent leurs origines dans les limitations d'IPv4.

Il n'y a plus de préfixe réseau public disponible ni, a fortiori, d'adresse publique. Or, l'adresse est un élément indispensable à la connectivité au réseau Internet. Sans adresse, un nœud est invisible. Il ne peut rien recevoir ni envoyer, et rend toute communication impossible. La demande de connectivité à Internet, autrement dit d'adresses, loin de diminuer, va au contraire s'accroître dans les prochaines années avec les nouvelles applications telles que la domotique et la route intelligente. Ces dernières impliquent une masse importante d'objets numériques connectés. Ces applications se développent en IPv6, car IPv4 n'a pas les capacités pour les supporter. Il n'est pas adapté pour interconnecter la multitude des composants numériques : son plan d'adressage à 2^{32} , soit environ 4,3 milliards d'adresses, est trop restreint. Il n'y aurait même pas assez d'adresses pour chaque être humain sur la planète, même si l'allocation d'adresses était parfaite.

Cette taille insuffisante du plan d'adressage n'est pas due à une erreur des concepteurs d'IPv4 mais provient du progrès technologique. Le paradigme de l'ordinateur a beaucoup évolué depuis les années 1960. Au début, il y avait un ordinateur par organisation. Puis il y a eu un ordinateur par département. Ensuite, l'arrivée de la micro-informatique a amené un ordinateur par personne. Enfin, avec la généralisation du numérique dans divers objets du quotidien, on en arrive à plusieurs ordinateurs (machines ou objets connectés) par personne. Il est de plus en plus évident qu'IPv4 est devenu inadapté pour répondre aux besoins d'interconnexion des ordinateurs. Après près de 50 ans d'existence, l'espace d'adressage IPv4 de l'Internet est devenu insuffisant et a atteint la limite de ses capacités. IPv4 est maintenant un problème dans le développement de l'Internet à cause de la complexité et du coût de connectivité grandissant qu'il introduit. Au sein de l'IETF, il y a des voix qui s'expriment pour rendre IPv4 obsolète. Cette volonté se concrétise début 2016 par la publication d'un document de travail qui prône de rendre IPv4 historique^[1]. Ce document illustre bien qu'IPv4 est limité et qu'il est temps de passer à IPv6. Car c'est bien dans les limitations d'IPv4 que la motivation au passage d'IPv6 est à trouver.

Au cours de cette activité, nous exposerons les motivations et les contraintes du déploiement d'IPv6. Ensuite nous décrirons les types de mécanismes d'intégration d'IPv6, leurs principes et leurs limites. Enfin, nous rappellerons aussi le plan de migration vers IPv6 initialement planifiée et celui qui est suivi de nos jours.

Motivations pour IPv6

C'est en partant du constat des limitations et des problèmes induits par l'utilisation d'IPv4 que les motivations en faveur de l'adoption d'IPv6 apparaissent. Le changement du paradigme de l'ordinateur a rendu IPv4 obsolète. Il faut aujourd'hui un grand espace d'adressage. Les nouveaux usages de l'Internet avec les nouveaux objets connectés demandent énormément d'adresses. Dépasser la pénurie d'adresses, c'est ouvrir la voie à de nouveaux services, c'est laisser la porte ouverte à de nouveaux acteurs innovants, c'est pouvoir créer de nouveaux marchés pour de nouveaux besoins. Le passage à IPv6 devient une nécessité car, en attribuant une adresse à chaque nœud du réseau, la connectivité en IPv6 retrouve les principes qui ont fait le succès du fonctionnement de l'Internet, et notamment celui du "bout-en-bout". Car ce principe a été perdu avec l'utilisation du NAT qui a été introduit suite au manque d'adresses. Sans le NAT, la communication vers un serveur retrouve sa simplicité originelle. En effet, il est beaucoup plus simple et direct d'accéder à un serveur lorsque celui-ci à une adresse IP publique. Il n'est pas soutenable que la croissance du réseau s'effectue avec une complexité croissante comme avec IPv4. Tout ceci est bien connu et cette évolution est qualifiée par "non passage au facteur d'échelle" (*not scalable*). Ainsi, avec cette simplicité retrouvée, de nouveaux champs d'application s'ouvrent à l'internet en IPv6. Le [RFC 7368](#) en donne une illustration avec la domotique. Enfin, sans le NAT, il est aisé d'introduire un nouveau protocole de transport pour des nouveaux services de communications. Un protocole de transport est localisé au niveau des hôtes (à chaque bout de la communication). Le principe de bout en bout change tout pour les applications et pour l'extensibilité du réseau.

En plus de la simplicité retrouvée, IPv6 apporte de nouvelles fonctionnalités, comme la configuration automatique d'un réseau. Avec IPv6, le réseau peut se gérer uniquement au niveau des routeurs, les stations construisant leurs adresses automatiquement, alors qu'avec IPv4, chaque équipement doit se voir attribuer une adresse et obtenir sa configuration depuis un serveur qui reste à gérer. Pour les réseaux avec un grand parc de machines, c'est d'autant plus intéressant.

Geof Huston dans l'article[\[2\]](#) ajoute un autre argument lié à la sécurité dans l'Internet des objets. Comme un balayage de l'espace d'adressage IPv4 prend 5 minutes, un objet peut être victime d'une action "pirate". En IPv6, l'espace d'adressage est si grand qu'il est impossible de balayer tout un réseau pour trouver les adresses utilisées, ce qui rend les nœuds quasiment indétectables. En effet, il faut 41 000 ans en IPv6 pour balayer exhaustivement un préfixe /64. Cette caractéristique sur la taille rend IPv6 indispensable pour l'internet des objets car elle rend

les objets indétectables par un simple sondage, tout en les laissant accessibles. En pratique, le [RFC 7707](#) montre que cette affirmation n'est pas si vraie. Les adresses IPv6 peuvent être attribuées selon des conventions d'adressage comme "utiliser l'identifiant 1 pour le routeur". Des stratégies de balayage "malin" peuvent débusquer les nœuds dans un réseau. La connaissance à priori du constructeur des interfaces réseaux, donc de son identifiant OUI (*Organizationally Unique Identifier*) réduira l'espace des identifiants d'interface (IID) de 64 à 24 bits, par exemple. Dissimuler les adresses IP des nœuds devient de la sécurité par l'obscurité : cela peut ralentir l'attaquant, mais cela ne doit certainement pas être utilisé comme unique moyen de défense car, tôt ou tard, l'attaquant trouvera ces adresses. Il n'en reste pas moins que le balayage est bien plus facile et rapide en IPv4 qu'en IPv6.

Ce sont toutes ces raisons qui donnent la véritable motivation du passage à IPv6 à savoir avoir un Internet adapté au besoin de l'informatique d'aujourd'hui.

Les contraintes du déploiement d'IPv6

Nous avons vu, dans les séquences précédentes, les détails de la technologie de communication liée à IPv6. Nous avons pu constater que le format des paquets et des adresses sont différents de ceux d'IPv4, et ces différences font que ces deux versions d'IP ne peuvent pas interopérer. L'internet actuel fonctionne en IPv4 mais il a besoin d'IPv6 pour continuer sa croissance. Quelle que soit la version d'IP utilisée, l'objectif est de maintenir une connectivité globale. Se pose alors le problème de la coexistence des deux versions d'IP au sein d'un seul Internet. Plus exactement, le monde IPv6 doit intégrer des mécanismes afin qu'il puisse interopérer avec l'internet version 4, c'est-à-dire la partie de l'internet qui utilise encore IPv4. Comme il n'y aura pas de jour du grand basculement d'IPv4 à IPv6, l'introduction d'IPv6 dans l'internet s'effectue de façon progressive et en s'étalant dans le temps. Elle doit même se faire sans que l'utilisateur puisse s'en apercevoir. La phase de transition doit être simple ou, au minimum, moins compliquée qu'une utilisation prolongée d'IPv4. Cette introduction d'IPv6 progressive et sans rupture dans l'internet démontre qu'IPv6 est une évolution d'IPv4. La migration doit se focaliser sur les nouveaux réseaux tout en laissant les anciens fonctionner sous IPv4. L'apparition d'IPv6 ne signifie pas que IPv4 cesse d'exister. En effet, la base d'équipements et de logiciels installés est tellement importante que cela assure au protocole IPv4 une durée de vie quasi "illimitée" à l'échelle humaine. Ceci rend l'idée de la migration sans fin. En fait, c'est notamment au travers des extensions du réseau actuel qu'IPv6 viendra suppléer IPv4. Cet objectif de déployer IPv6 tout en laissant fonctionner IPv4 est rappelé dans le [RFC 7381](#), qui décrit la démarche pour le déploiement d'IPv6 dans un réseau administré.

Cette idée d'un protocole visant à soulager IPv4 est marquée par le terme d'*intégration*. Le terme de *transition*, lorsqu'il est utilisé, porte l'idée du remplacement d'IPv4 par IPv6. Le remplacement est plus anxiogène car il annonce une migration d'un système de communication qui fonctionne pour aller vers un système plus inconnu. Le but du maintien d'IPv4 en activité est aussi d'éliminer la peur de détruire quelque chose qui fonctionne. De plus, dans le contexte actuel d'un Internet en IPv4, déployer IPv6 ne signifie pas que le réseau ne doit utiliser qu'IPv6. Au contraire, le déploiement d'IPv6 doit s'intégrer dans le réseau actuel et être vu comme une extension du réseau présent.

Principes des mécanismes d'intégration

Ainsi, IPv6 doit se déployer sans remettre en cause l'existant, qui est opérationnel. Mais que faut-il faire pour passer son réseau en IPv6 ? En fait, il n'y a pas une solution unique, mais plusieurs réponses qui dépendent de la place occupée par IPv6 dans le système de communication. Il faut distinguer la bordure (les hôtes) et l'infrastructure de communication. L'infrastructure de communication traite du transport des données. Les hôtes sont les consommateurs et producteurs de données ou, de manière classique, les clients et les serveurs. La distinction entre hôte et réseau conduit à identifier six cas[3] :

1. un hôte IPv4 qui communique avec un hôte IPv4 via un réseau IPv4 ;
2. un hôte IPv6 qui communique avec un hôte IPv6 via un réseau IPv6 ;
3. un hôte IPv6 qui communique avec un hôte IPv6 via un réseau IPv4 ;
4. un hôte IPv4 qui communique avec un hôte IPv4 via un réseau IPv6 ;
5. un client IPv4 qui communique avec un serveur IPv6 ;
6. un client IPv6 qui communique avec un serveur IPv4.

Chaque cas pose un problème particulier qui demande un mécanisme dédié. En contrepartie, chaque mécanisme de transition introduit une charge administrative supplémentaire dans le réseau. Ces mécanismes dits d'intégration n'ont pas pour vocation à exister durablement. Ils devraient décroître dans le temps en fonction du nombre d'équipements IPv6 présents sur le réseau. Ils servent à rendre le coût du déploiement supportable en partant des composants existants. Les nouvelles applications, comme par exemple la domotique, pourraient directement démarrer en IPv6 natif et se passer des mécanismes.

Double pile

Le premier cas exprime le point de départ de la migration ; le second cas en représente le point d'arrivée. La première idée, pour passer de IPv4 à IPv6, est d'avoir des nœuds qui soient bilingues en quelque sorte, c'est-à-dire capable de parler en IPv6 ou en IPv4 en fonction des capacités de leur correspondant. Pour cela, IPv4 et IPv6 coexistent dans les mêmes nœuds et les mêmes réseaux. Ainsi, les nœuds IPv6 restent compatibles avec les nœuds IPv4. Lorsqu'une nouvelle machine est déployée, elle possède donc une adresse IPv4 et une adresse IPv6. Avec cette idée, la croissance de la taille de l'Internet de ces dernières années aurait été aussi celle d'IPv6. La figure 5 schématise le principe de la communication en double pile. Le déploiement d'IPv6 en double pile était le plan originel de migration. Après la période de spécification que furent les années 90, les années 2000 devaient servir au déploiement des solutions d'intégration. Ainsi, quand le plan d'adressage IPv4 viendrait à épuisement dans la première moitié des années 2010, IPv6 aurait été déployé. Hélas, cette idée n'a pas abouti car elle avait un coût immédiat dû à la double configuration pour un gain futur (à la fin du plan d'adressage IPv4). L'attentisme a régné au niveau du marché et des acteurs comme les fournisseurs d'accès. Ceux-ci n'ont pas montré un réel empressement à déployer une infrastructure en IPv6 pour fournir des préfixes IPv6 afin que leurs clients fonctionnent en double pile. Le déploiement de nœuds double pile a été au final très limité. Nous nous retrouvons maintenant avec deux problèmes à gérer simultanément : l'intégration d'IPv6 et l'épuisement des adresses IPv4 disponibles. Il est à noter que les mécanismes qui suivent

(tunnel et traduction) reposent sur des machines à double pile. Elles sont capables de communiquer dans les deux protocoles.

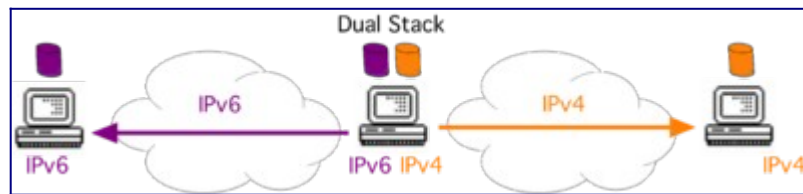


Figure 5 : Double pile.

Tunnel

Les cas 3 et 4 se résolvent à l'aide de tunnels. Le paquet de la source est placé dans une enveloppe qui est en fait un paquet dans la version IP du réseau. Dans le troisième cas, une connectivité IPv6 est offerte au travers d'une infrastructure IPv4 existante comme le représente la figure 6. On parle de câbles virtuels (*software*) : un câble virtuel est un tunnel dans lequel une extrémité du tunnel encapsule les paquets IPv6 dans des paquets IPv4. Les paquets IPv4 transitent dans l'infrastructure IPv4 pour rejoindre l'extrémité du tunnel qui va désencapsuler le paquet IPv6. Le câble virtuel forme une liaison point à point entre 2 nœuds IPv6. IPv4 est alors vu comme un système de transmission, comme peut l'être Ethernet ou une liaison Wifi. Le masquage de la topologie du réseau IPv4 à IPv6 peut conduire à faire un routage des paquets IPv6 susceptible d'être "sous-optimal". Par conséquent, la solution des tunnels doit se faire en essayant de suivre la topologie du réseau et ces tunnels doivent être les plus courts possibles en terme de routeurs IPv4 traversés. Comme les systèmes d'extrémités sont compatibles, la solution à base de tunnels introduit certes une complexité, mais ce n'est pas la plus forte.

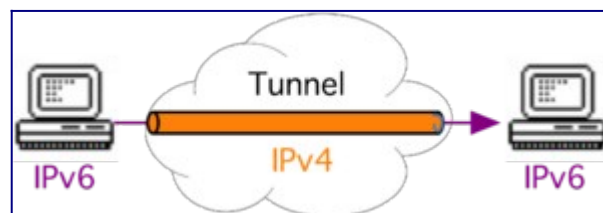


Figure 6 : Tunnel.

Traduction

Les deux derniers cas traitent la situation où les extrémités sont incompatibles. Pour certaines catégories d'applications, comme le mail ou le web, le succès d'IPv6 est fortement lié à l'interopérabilité avec IPv4 puisque, jusqu'à présent, la majorité des informations et des utilisateurs ne sont accessibles qu'avec cette version du protocole. Pour des applications distribuées, la technique de traduction (*translation*) consiste à rendre possible la communication entre un système IPv6 et un système IPv4, comme indiqué par la figure 7. C'est l'idée du NAT d'IPv4 appliquée à IPv6. Dans le cas du NAT IPv4, le format du paquet reste le même, mais avec IPv6, le format du paquet change en même temps que les adresses. Ainsi, un côté du NAT est en IPv4 et l'autre côté repose sur IPv6.

Cette traduction peut se faire à différents niveaux de l'architecture réseau :

- au niveau applicatif, par des passerelles ou ALG (*Application Level Gateway*). Le proxy est un exemple d'ALG qui comporte, en plus des fonctions de traduction, un cache. Le principe d'une traduction par une ALG consiste à ce que le client envoie sa requête en IPv6 à la passerelle applicative. Celle-ci la renvoie vers le serveur en IPv4. Dans l'exemple du DNS, ceci se conçoit très facilement. Le *resolver* du client envoie la requête au serveur local en IPv6. Ce dernier envoie la requête au serveur suivant en IPv4. De même, certains protocoles applicatifs, tel le protocole de transfert de courrier SMTP, fonctionnent nativement en mode relais. Le message passe de relais en relais pour atteindre le serveur de courrier de destination. Le relayage s'effectuant au niveau applicatif, chaque saut peut indifféremment s'effectuer en v6 ou en v4. Pour ces applications largement diffusées, comme le web, la messagerie, le DNS, ou encore les serveurs d'impression, la traduction est donc relativement simple à faire. On peut également souligner que le web et la messagerie constituent une part significative des flux Internet actuels. Cette méthode de migration devrait permettre de traiter la majorité des flux. Mais sa mise en œuvre est spécifique car l'ALG est très liée à l'application et la multiplication des applications empêche d'avoir une proposition universelle ;
- au niveau réseau, par des NAT qui agissent au niveau de l'en-tête IP. Le paquet IPv4 est construit à partir d'informations déjà contenues dans l'en-tête IPv6, en particulier différents formats d'adressage permettent de véhiculer une adresse IPv4 dans une adresse IPv6 (le [RFC 6052](#) formalise les différentes variantes d'embarquement d'une adresse IPv4 dans une adresse IPv6). La difficulté d'assurer la compatibilité entre les deux mondes n'est, cependant, pas symétrique. Il est beaucoup plus facile d'initier une session partant du monde IPv6 pour aller vers le monde IPv4. Autrement dit, il est plus facile d'avoir le client du côté IPv6 et le serveur du côté IPv4. En effet, un client IPv6 peut gérer une adresse IPv4 (une adresse sur 128 bits peut contenir une adresse sur 32 bits). Dans le sens inverse, c'est plus complexe : le client IPv4 se retrouve à gérer une adresse en 128 bits et, de plus, il est impossible de modifier l'existant en IPv4 ;
- au niveau transport, au moyen de relais SOCKS [[RFC 1928](#)] ou de relais TRT (*Transport Relay Translator*) [[RFC 3142](#)]. Les relais transport peuvent être perçus comme des "proxys génériques" pour relayer de manière contrôlée les protocoles TCP ou UDP. L'équipement relais accepte les flux ou connexions entrantes issus du client, auprès de qui il se fait donc passer pour le serveur, et les relaie vers le serveur authentique en se faisant passer pour le client. Ce type de solution n'est pas totalement satisfaisante d'un point de vue sécurité car le relais a un comportement de type «*Man in the Middle*» qui intercepte et éventuellement manipule les flux, y compris les flux sécurisés tels que TLS ou SSH. Ce relais peut en effet négocier une clé intermédiaire lors de l'initialisation de la session sécurisée comme SSH (*Secure Shell*) et déchiffrer le flux SSH reçu avant de le réémettre chiffré avec sa propre clé sur la connexion de sortie. Le relayeur aurait alors tout loisir d'observer le flux en clair. C'est une des limitations importantes des passerelles de niveau transport. Quel niveau de confiance peut-on accorder à la passerelle transport ? On notera également que, compte tenu de son niveau (transport), le relais bloque les flux de contrôle de niveau réseau (ICMP, ICMPv6). Pour ces raisons, l'usage de relais transport est donc aujourd'hui déconsidéré en faveur des deux autres

mécanismes précédents.

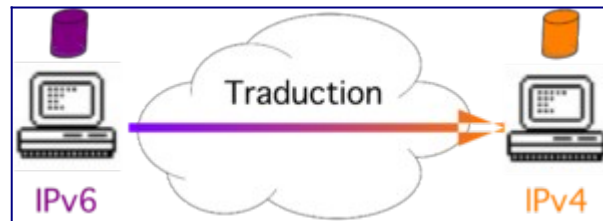


Figure 7 : Traduction IPv6-IPv4.

Quel scénario pour le déploiement ?

Maintenant que nous avons posé les contraintes du déploiement d'IPv6 et énuméré les mécanismes d'intégration, la question est : quel est le plan envisagé du déploiement d'IPv6 dans l'internet actuel ?

Le plan originel de migration de l'internet reposait sur le mécanisme dit de la double pile, comme le rappelle G. Huston[4] par la figure 2.

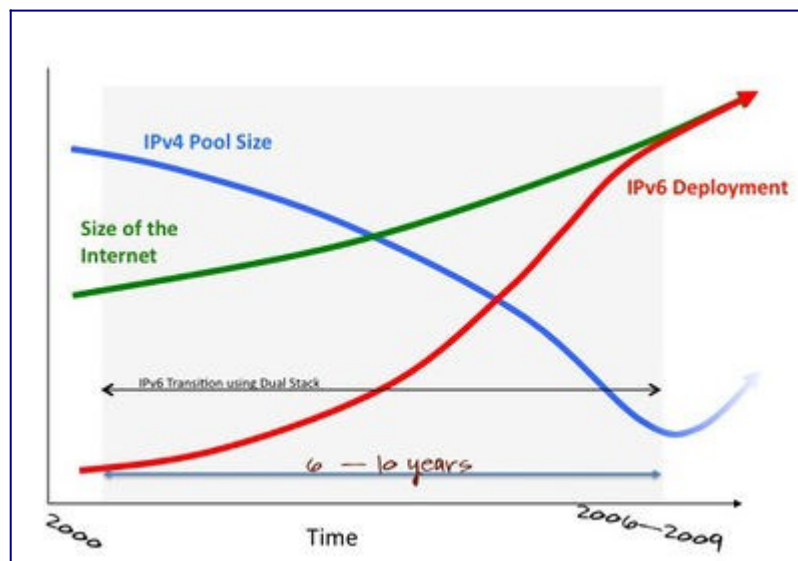


Figure 2 : Plan de migration vers IPv6.

Cependant, le problème de la pénurie d'adresses IPv4 n'est pas résolu avec ce mécanisme, puisque l'interface réseau d'un équipement en double pile possède une adresse de chaque version IP. La croissance de l'internet continue de consommer des adresses IPv4. Mais cela offre la possibilité de déployer des nœuds IPv6 afin de vérifier, dans un premier temps, la compatibilité de son réseau avec ce nouveau protocole. Les problèmes inhérents à l'utilisation d'IPv6 peuvent donc être identifiés très tôt. Ensuite, dans un second temps, cela augmente la base des nœuds IPv6 installés. Au fur à mesure du déploiement de ces nœuds, les communications pourront se faire de plus en plus souvent en IPv6. En effet, le client en double pile utilisera en priorité IPv6 pour joindre un serveur lui-même en double pile. Le protocole IPv4 reste cantonné au cas où la tentative échoue en IPv6, ou si le serveur est resté sur l'ancienne version d'IP. Enfin, dans un dernier temps, quand la majorité des services sera accessible en IPv6, la croissance de l'internet pourra se poursuivre en IPv6 uniquement. Il deviendra envisageable de se passer d'IPv4 et de ses NAT (*Network Address Translation*). Un cercle

vertueux est enclenché. L'effort d'interopérabilité aura changé de camp, rendant IPv4 encore plus complexe à utiliser, et par conséquent, accélérant encore le passage à IPv6.

Malgré la disponibilité des équipements supportant la double pile, les acteurs de l'internet tels que les FAI (Fournisseurs d'Accès à Internet), les hébergeurs et les administrateurs de sites n'ont pas perçu l'urgence d'intégrer IPv6 dans leurs activités. Les doubles piles déployées sur les nœuds de l'internet restent largement inutilisées par rapport au plan initial, comme le montre la figure 3. La croissance de l'internet s'est poursuivie en IPv4, et celle-ci a donc été affectée par plusieurs effets néfastes comme nous l'avons vu précédemment dans ce cours. L'échec du plan initial est largement dû à la dérégulation appliquée dans le secteur des télécommunications qui a conduit les acteurs à privilégier le court terme, et les rend incapables de prendre en compte les besoins à plus long terme dans leurs activités[4]. Dans l'incapacité de réaliser un déploiement coordonné d'IPv6 qui profiterait à tous, chaque acteur a des actions individuelles qui sont raisonnables pour lui, mais coûtent cher à tous. Comme le note S. Bortzmeyer : "déployer IPv6 coûte à celui qui le déploie, ne pas le déployer coûte équitablement à tout le monde"[5].

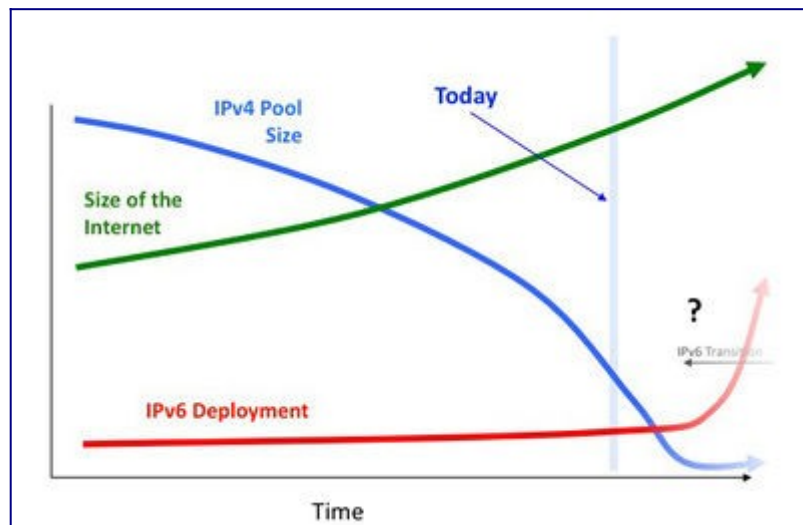


Figure 3 : État du plan de migration initial.

Avec l'intégration d'IPv6 dans les principaux systèmes d'exploitation[6] et malgré l'attente d'une grande majorité des acteurs de l'internet, de plus en plus d'infrastructures de communication et d'hébergeurs proposent leurs services en IPv6. Certains FAI donnent maintenant une connectivité IPv6 à leurs clients et ceux qui n'ont pas cette chance peuvent se rabattre sur un accès IPv6 via des tunnels. Ces derniers sont souvent gratuits[7]. Les performances en IPv6 ont été fortement améliorées avec la multiplication des points de présence des FAI en IPv6. Un point de présence est un lieu géographique du FAI contenant un nœud de son réseau fédérateur ; autrement dit, un point de connectivité pour le réseau de distribution de ses utilisateurs. De nos jours, comme un grand nombre d'applications (mail, supervision, firewall...) intègre désormais IPv6, il est beaucoup plus aisé de déployer IPv6 dans son réseau qu'il y a une dizaine d'années. Mais il faut faire ce passage le plus tôt possible de manière à traiter progressivement et sereinement les inévitables bugs logiciels et erreurs de configuration qui surviendront.

Conclusion

L'adoption d'IPv6 dépend des besoins de chacun mais aussi de la hausse du coût généré par la pénurie d'adresses IPv4. Quand ce coût dépasse une valeur admise propre à chaque acteur, la décision du passage à IPv6 s'impose. IPv6 peut s'utiliser dans le réseau de son site, que son réseau de communication soit à construire ou qu'il existe déjà, que la connectivité de son opérateur soit ou non en IPv6. Notons qu'il est envisageable de déployer un intranet en IPv6 tout en laissant les communications avec l'internet en IPv4. Quoi qu'il en soit, tant qu'il y aura de l'internet version 4, il faut maintenir cette connectivité depuis le monde IPv6. Donc, en plus du déploiement d'IPv6, il faut installer des éléments pour réaliser cette connectivité.

Pour chaque situation, l'IETF a développé des mécanismes de coexistence[8]. Chaque mécanisme répond à une problématique précise du déploiement d'IPv6 dans un monde IPv4. La migration vers IPv6 ne soulève pas tous les problèmes possibles. Par conséquent, il faut choisir les mécanismes qui s'appliquent à sa situation. Le fait qu'il y ait un choix à faire dans la multitude des mécanismes est même devenu un argument pour ne pas passer à IPv6. Cette multitude renvoie une image de complexité. Il faut comprendre que chaque technique répond à un problème bien précis, et qu'il n'est pas nécessaire de maîtriser toutes les techniques. C'est à partir de l'étude de ses propres besoins qu'il faut identifier lesquelles des techniques sont à appliquer. La démarche consiste, à partir de l'inventaire du réseau IPv4, à se demander ce qui n'est pas compatible IPv6. Dans la situation d'un nouveau réseau IPv6, ce sont les services accessibles uniquement en IPv4 qui vont guider le choix. La question à élucider quelle que soit la situation est la suivante : quels sont les problèmes qui vont apparaître en utilisant IPv6 ? C'est à partir de ce constat que les techniques de transition vont être retenues. Alors, ce sont ces techniques-là qu'il convient d'apprendre et de maîtriser. Par exemple, après une étude de son réseau de communication, l'utilisation d'IPv6 montre un problème sur la connectivité avec l'internet version 6 car son fournisseur d'accès Internet est resté en IPv4. Un tunnel statique peut être la solution.

Il convient de garder à l'esprit que la finalité n'est pas d'installer des mécanismes d'intégration. Ces mécanismes sont vus comme temporaires, mais sur une période temporaire qui peut durer. L'objectif final est d'avoir l'internet en IPv6 partout comme le rappelle le [RFC 6180](#). Le but des mécanismes de coexistence est de faciliter le déploiement progressif et indépendant du protocole IPv6 dans tous les segments du réseau constituant l'internet. Lorsque cela sera fait, ces mécanismes deviendront obsolètes et leur disparition rendra l'usage d'IPv6 beaucoup plus simple, à l'image d'IPv4 avant l'apparition de son problème de pénurie d'adresses.

La démarche du déploiement d'IPv6 dans un réseau administré d'une organisation est décrite dans le [RFC 7381](#). Ce document suggère 3 phases :

1. Une phase de préparation et d'analyse au cours de laquelle l'inventaire de l'existant est effectué afin de déterminer quels sont les matériels et les logiciels fonctionnant en IPv6. Le choix de la phase suivante est aussi décidé en fonction des priorités de l'organisation.
2. Une phase interne consistant à déployer IPv6 pour les communications internes.
3. Une phase externe dans laquelle il s'agit de traiter la connectivité de son intranet avec l'internet.

Les auteurs[9] montrent aussi que selon l'usage du réseau (mobile, fixe, ou de voix sur IP), la stratégie de migration n'est pas la même et doit prendre en compte leurs spécificités. Plusieurs mécanismes de la migration vers IPv6 sont présentés dans la suite de ce chapitre : le déploiement d'IPv6 dans le réseau local en premier lieu, le maintien de la connectivité entre les îlots IPv6 ensuite et, pour finir, l'interopérabilité avec les services en IPv4.

Références bibliographiques

1. ↑ Pépin G. (2016) Article en ligne sur Next Impact. [Un brouillon de RFC propose de déclarer l'IPv4 obsolète.](#)
2. ↑ Huston, G. (2015) The ISP Column. [The Internet of Stupid Things](#)
3. ↑ Soussi, M. (2011). AFNIC's Issue Papers. [IPv6, A Passport For The Future Internet](#)
4. ↑ [4.0 4.1](#) Huston, G. (2008). The ISP Column. [The Changing Foundation of the Internet: Confronting IPv4 Address Exhaustion](#)
5. ↑ Bortzmeyer, S. [IPv6 ou l'échec du marché](#)
6. ↑ Wikipedia. [Comparison of IPv6 support in operating systems](#)
7. ↑ Linux Review. [Free IPv4 to IPv6 Tunnel Brokers](#)
8. ↑ RIPE NCC. (2015). Article en ligne. [Transition Mechanisms](#)
9. ↑ Boucadair, M.; Binet, D. et Jacquenet, C. (2011). Techniques de l'ingénieur. [Transition IPv6 - Outils et stratégies de migration](#)

Pour aller plus loin

Pénurie d'adresses IPv4

- Bortzmeyer, S (2014), article de blog: [Épuisement des adresses IPv4](#)
- Huston, G. (2014) [The Internet in Transition: The state of the transition to IPv6 in Today's Internet and of measures to support the continued use of IPv4](#) .
- Huston, G (2015). [Addressing 2014 - And then there were 2!](#)
- Van Beijnum, I. (2014). [With the Americas running out of IPv4, it's official: The Internet is full](#)

Statistiques sur IPv6

- APNIC [IPv6 Deployment Report](#)
- APNIC Lab [List of statistics](#)
- APNIC [IPv6 deployment support site](#). (*Useful and up to date information on IPv6*)
- RIPE [IPv6 statistics](#)
- RIPE Lab [List of statistics](#)
- Internet Society [Liste de pointeurs](#)
- [IPv6 Users by Country](#)
- [IPv6 CIDR report](#)
- [IPv6 host count](#) by IPv6 matrix

Techniques de transition

- Wikipedia [IPv6 transition mechanism](#)

RFC et leur analyse par S. Bortzmeyer :

- [RFC 1918](#) Address Allocation for Private Internets [Analyse](#)
- [RFC 1928](#) SOCKS Protocol Version 5
- [RFC 2663](#) IP Network Address Translator (NAT) Terminology and Considerations [Analyse](#)
- [RFC 2993](#) Architectural Implications of NAT [Analyse](#)
- [RFC 3142](#) An IPv6-to-IPv4 Transport Relay Translator
- [RFC 4864](#) Local Network Protection for IPv6
- [RFC 5128](#) State of Peer-to-Peer (P2P) Communication across Network Address Translators (NATs) [Analyse](#)
- [RFC 5684](#) Unintended Consequence of NAT deployments with Overlapping Address Space [Analyse](#)
- [RFC 6052](#): IPv6 Addressing of IPv4/IPv6 Translators [Analyse](#)
- [RFC 6180](#) Guidelines for Using IPv6 Transition Mechanisms during IPv6 Deployment [Analyse](#)
- [RFC 6269](#) Issues with IP Address Sharing [Analyse](#)
- [RFC 6319](#): Issues Associated with Designating Additional Private IPv4 Address Space [Analyse](#)
- [RFC 6586](#) Experiences from an IPv6-Only Network [Analyse](#)
- [RFC 6888](#): Common requirements for Carrier Grade NATs (CGNs) [Analyse](#)
- [RFC 7021](#) Assessing the Impact of Carrier-Grade NAT on Network Applications [Analyse](#)
- [RFC 7368](#) IPv6 Home Networking Architecture Principles [Analyse](#)
- [RFC 7381](#) Enterprise IPv6 Deployment Guidelines [Analyse](#)
- [RFC 7663](#) IAB Workshop on Stack Evolution in a Middlebox Internet (SEMI) Report [Analyse](#)
- [RFC 7707](#): Network Reconnaissance in IPv6 Networks [Analyse](#)

Activité 41 : Communiquer en double pile

Introduction

Une organisation qui a une infrastructure de communication reposant sur le protocole IPv4 rencontre des difficultés pour faire croître son réseau de manière simple. Elle décide de passer à IPv6 avec, comme cahier des charges :

- déployer IPv6 sans casser ou perturber ce qui fonctionne en IPv4 ;
- rendre le déploiement complètement transparent à l'utilisateur ;
- viser des améliorations en terme de simplicité de gestion et de performance du réseau ou, au pire, que cette dernière soit équivalente à celle obtenue en IPv4 ;
- maintenir la connectivité avec l'Internet IPv4.

Afin d'avoir un déploiement progressif d'IPv6, elle s'oriente vers un déploiement en double pile qui est un des premiers mécanismes de coexistence, et le plus recommandé. En effet, il évite les problèmes liés à l'utilisation des tunnels. C'est la technique de transition originellement envisagée comme nous le rappellerons. La suite de ce document décrit les principaux éléments relatifs à l'activation d'une double pile. Dans un premier temps, l'adressage et la configuration à mettre en place sont étudiés. Ensuite, les points propres à chacune des principales applications réseaux (DHCP, DNS, pare-feu, supervision) à prendre en compte lors du passage en IPv6 sont soulevés. Enfin, les problèmes induits par l'utilisation de la double pile ainsi que leurs solutions sont précisés.

Technique de la double pile

Le mécanisme de double pile IP (*Dual Stack*), spécifié par le [RFC 4213](#), consiste à doter un équipement du réseau de la pile protocolaire IPv6, en plus de celle d'IPv4, et d'affecter une adresse IPv4 et IPv6 à chaque interface réseau. La configuration des équipements réseaux en double pile exige clairement un double travail de configuration à la fois en IPv4 et en IPv6. L'utilisation parallèle des piles IPv4 et IPv6 vise l'intégration de IPv6 tout en assurant aux nœuds en double pile une compatibilité parfaite avec le réseau IPv4 existant. Ainsi, les nœuds en double pile sont capables de communiquer dans les deux versions du protocole IP. La figure 1 illustre ce principe.

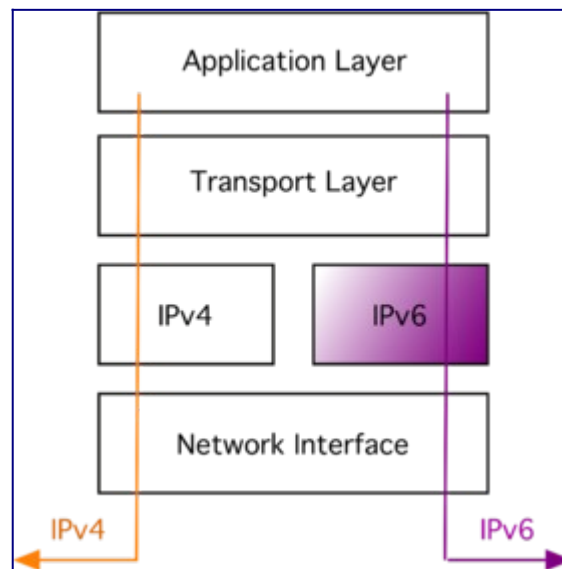


Figure 1 : Architecture d'un nœud en double pile.

Dans le cas d'un routeur, il y a une table de routage pour chaque version du protocole. Le routeur est ainsi capable de relayer à la fois les paquets IPv6 et IPv4. De cette façon, IPv4 et IPv6 coexistent sur la même infrastructure. Autrement dit, IPv6 n'a pas besoin d'une infrastructure dédiée.

La technique de la double pile résout le problème d'interopérabilité lié à l'introduction de la pile IPv6. Quand cela est possible, la communication se fait en utilisant la nouvelle version du protocole. Dès qu'un des éléments n'est pas compatible (réseau, système d'exploitation, application), le protocole IPv4 est utilisé. Mais, pour que cette technique soit pleinement utilisable, cela implique que les routeurs entre les 2 correspondants soient aussi configurés pour router les deux types de paquets et que des applications soient capables de traiter des communications avec des adresses IPv6. Avec cette technique, il est possible d'écrire des applications en IPv6 qui restent compatibles avec les applications IPv4 existantes.

Étude et préparation du déploiement d'IPv6

En fonction du contexte de déploiement, les enjeux et contraintes ne seront pas les mêmes. Il faut distinguer le réseau résidentiel de l'utilisateur domestique qui se caractérise par l'absence d'administration, du réseau d'entreprise qui est administré.

- Au sein d'un réseau résidentiel, les problématiques sont liées à la configuration des équipements terminaux, au déploiement des services de résolution de noms et configuration d'adresses, ainsi qu'aux performances perçues par l'utilisateur.
- Dans le cas d'un réseau d'entreprise, il faudra ajouter les problématiques d'obtention du préfixe IPv6, la définition du plan d'adressage, et la configuration du routage IPv6, en plus de celui d'IPv4. Comme les réseaux d'entreprises hébergent de nombreux services tels que le DNS ou le web, il faut aussi prendre en compte la mise à niveau de ces services.

Méthode

L'intégration d'IPv6 dans un réseau d'entreprise demande de la méthode, comme le montre le [RFC 7381](#). Une phase d'étude et d'analyse est un préalable indispensable pour identifier les points bloquant à l'intégration d'IPv6 dans le contexte professionnel.

L'intégration d'IPv6 commence par la désignation d'une personne en charge de suivre et coordonner les actions liées à l'intégration d'IPv6. Sa première tâche consistera à dresser un inventaire des équipements du réseau afin de déterminer ceux qui supportent IPv6. Cet inventaire va être un élément clef pour orienter le choix des techniques de transition. Par exemple, si de nombreux segments du réseau ne sont pas "IPv6 compatible", il n'est pas question de tout jeter et de racheter, mais il faudra retenir la technique de transition adaptée à son réseau. En plus du matériel, il faut également faire l'inventaire des logiciels utilisés pour déterminer lesquels supportent IPv6 et lesquels nécessitent une mise à jour.

Les applications "métiers", développées en interne, doivent être modifiées le plus tôt possible afin de les rendre capables de manipuler des adresses sur 128 bits. Le [RFC 4038](#) propose des méthodes pour développer du code indépendant des versions d'IP. Dans une note^[1] S. Bortzmeyer propose d'utiliser des bibliothèques de langage de plus haut niveau d'abstraction. Ainsi, les détails de la communication ne remontent pas jusqu'au développeur d'application. Le [RFC 6724](#) indique comment sélectionner les adresses sources. Le [RFC 8305](#) liste et solutionne les problèmes liés à la baisse de performance parfois observée dans les déploiements "double pile". Ce dernier point est développé dans la section "Déploiement au niveau des services" de cette activité.

Un point, dans cette phase d'étude, à ne pas négliger concerne la sécurité. L'essentiel des failles de sécurité d'un réseau IPv6 est commune avec celles d'un réseau IPv4. Celles qui sont spécifiques à IPv6 peuvent être dues au manque de support d'IPv6 par les fournisseurs d'équipement de sécurité tels que les NIDS (*Network Based Intrusion Detection System*), pare-feu, outils de monitoring... Ces dispositifs doivent supporter IPv6 aussi bien qu'IPv4 mais ce n'est pas toujours le cas. La faible maturité du code source est également une faille relevée par le [RFC 7381](#). Les problèmes de sécurité spécifiques à IPv6 peuvent aussi être dus à la configuration. Les pare-feu et ACL (*Access Control List*) des logiciels peuvent avoir des règles strictes pour IPv4 mais beaucoup moins pour IPv6. Étant donné que leur réseau est beaucoup moins sollicité en IPv6, des administrateurs sont tentés de ne pas fournir autant d'efforts que pour la sécurisation d'IPv4. L'utilisation d'adresses protégeant la vie privée des utilisateurs [\[RFC 8981\]](#) complique également la tâche des administrateurs. Elles sont un frein pour une identification rapide des nœuds. Les mécanismes de transition reposant sur des tunnels encapsulant IPv6 sur les réseaux IPv4 apportent également des failles inhérentes à l'utilisation des tunnels [\[RFC 7123\]](#). S'ils sont mal déployés, ils peuvent créer des *back doors* qui offrent un moyen de passer outre les sécurités de l'entreprise (en particulier avec Teredo et 6to4 [\[RFC 6180\]](#)).

Même si IPv6 n'est pas déployé dans un réseau, il faut malgré tout prendre en compte IPv6 pour la sécurisation. En effet, la plupart des hôtes sont désormais en double pile. Ils ont une adresse IPv6 "lien-local" qui peut être utilisée pour la communication entre les équipements d'un même lien. Ce trafic peut être filtré sur les équipements de niveau 2 s'ils le permettent. La

double pile rend le nœud sensible aux attaques par fausses annonces de routeurs (*rogues RA*) [[RFC 6104](#)]. Ces annonces configurent chez les hôtes une fausse connectivité IPv6. Les hôtes enverront le trafic au routeur par défaut, lequel pourra fournir une connectivité IPv6 aux utilisateurs via des tunnels et mettre en œuvre des attaques de type MitM (*Man in the Middle*). Le [RFC 7113](#) propose une méthode d'analyse de l'en-tête IPv6 appelée 'RA-Guard (IPv6 Router Advertisement Guard) à *mettre en œuvre au niveau des commutateurs*. En dépit du fait que les annonces de routeurs illégitimes soient la plupart du temps le fait d'erreurs de configuration de machines hôtes qui émettent des RA, il ne faut néanmoins pas les négliger car une connectivité IPv6 non fonctionnelle ou de mauvaise qualité va affecter la qualité de service perçue par l'utilisateur (voir le paragraphe "problèmes liés à la double pile" de cette activité). Notons que la sécurisation des mécanismes d'autoconfiguration n'est pas un problème spécifique à IPv6. En IPv4, des serveurs DHCP mal intentionnés (idem pour DHCPv6) peuvent également envoyer des informations erronées suite à une requête DHCP. Aussi bien les RA que le DHCP peuvent être sécurisés via l'authentification des messages, mais ces solutions sont très peu déployées en pratique.

L'impact des différences entre les deux versions d'IP est souvent mal évalué. Par exemple, l'utilisation d'un préfixe IPv6 GUA pour les hôtes et l'absence de NAT, notamment dans les routeurs SOHO (*Small Office / Home Office*) est perçue comme une faille de sécurité. En plus des règles de filtrage nécessaires à la sécurisation, les [RFC 6092](#) et [RFC 7084](#) imposent que les routeurs SOHO filtrent par défaut les connexions venant de l'extérieur au réseau. De cette manière, l'absence de NAT dans le cadre d'IPv6 n'ouvrira pas plus de faille de sécurité que sur les routeurs SOHO en IPv4. La sécurité de IPv6 peut aussi être surévaluée, comme dans les attaques par balayage de l'espace d'adressage. Malgré la taille gigantesque de l'espace d'adressage en IPv6, le [RFC 7707](#) montre que IPv6 est malgré tout sensible aux attaques par balayage, et qu'il faut s'en protéger. À cet effet, le [RFC 6018](#) propose l'utilisation de *greynets* pour IPv4 et IPv6.

Ensuite, vient la problématique du routage interne. Les principaux protocoles de routage intègrent depuis longtemps IPv6. OSPFv3 supporte IPv4 et IPv6 mais diffère de OSPFv2 sur certains points. Notons qu'il est possible d'utiliser des protocoles de routage différents pour les trafics IPV4 et IPV6. Le document [\[2\]](#) (en cours d'étude au moment de la rédaction de ce document) détaille les choix de conception spécifiques au routage IPv6.

La phase de préparation inclut également le plan d'adressage et l'allocation des adresses. Ces points sont abordés en détail dans la suite de ce document.

Il apparaît donc clairement que l'intégration d'IPv6 nécessite d'impliquer de nombreux corps de métiers. Les formations adéquates doivent donc être proposées au personnel de l'entreprise. Cela inclut aussi bien les administrateurs système et réseau, ceux en charge du routage, de l'infrastructure, les développeurs, que le personnel des centres d'appel du support technique. À titre d'exemple, citons l'article [\[3\]](#) qui rapporte l'expérience de la migration en IPv6 d'un industriel.

Vérification de la disponibilité d'IPv6

Le protocole IPv6 et ses protocoles associés sont pris en charge par les systèmes d'exploitation

depuis plus de 10 ans. Il en découle qu'une grande majorité des nœuds de l'Internet comporte IPv6. Ainsi, au démarrage d'un nœud, même en l'absence d'un routeur IPv6 sur le lien de ce nœud, l'interface se configure automatiquement avec une adresse IPv6. Les exemples ci-dessous montrent que c'est le cas pour les OS les plus courants. Pour chacun des OS, une adresse "lien-local" (*link-local address*) a été allouée [voir la séquence 1]. Elle est utilisée pour les communications locales uniquement, comme par exemple le mécanisme de découverte de voisins [RFC 4861]. Elle n'est pas routable ni, par conséquent, utilisable pour une communication indirecte (passant par un routeur).

Pour que cette vérification soit une formalité, il est nécessaire, bien en amont de l'intégration d'IPv6, d'exiger, dans les achats de matériels et logiciels, la disponibilité d'IPv6 ou la compatibilité[4]. Par exemple, c'est ce qu'a fait le département nord-américain de la défense[5].

MacOSX 10.9.2

```
ifconfig en0
en0: flags=8863 mtu 1500
    ether 14:10:9f:f0:60:46
    inet6 fe80::1610:9fff:fef0:6046%en0 prefixlen 64 scopeid 0x4
    inet 192.168.1.143 netmask 0xffffffff broadcast 192.168.1.255
    nd6 options=1
    media: autoselect
    status: active
```

Linux 2.6.32 :

```
ifconfig eth0
eth0      Link encap:Ethernet  HWaddr 60:eb:69:9b:87:97
          inet  addr:195.154.87.139      Bcast:195.154.87.255
Mask:255.255.255.0
          inet6 addr: fe80::62eb:69ff:fe9b:8797/64 Scope:Link
          UP BROADCAST RUNNING MULTICAST  MTU:1500  Metric:1
          RX packets:75115704 errors:5 dropped:0 overruns:0 frame:5
          TX packets:17934141 errors:0 dropped:0 overruns:0 carrier:0
          collisions:0 txqueuelen:1000
          RX bytes:6583563265 (6.5 GB)  TX bytes:5944865545 (5.9 GB)
          Memory:feae0000-feb00000
```

Windows :

```
c:\> ipconfig
Windows IP Configuration
Ethernet adapter Local Area Connection:
Connection-specific DNS Suffix . :
IPv6 Address. . . . . : 2001:db8:21da:7:713e:a426:d167:37ab
Temporary IPv6 Address. . . . . : 2001:db8:21da:7:5099:ba54:9881:2e54
Link-local IPv6 Address . . . . . : fe80::713e:a426:d167:37ab%6
IPv4 Address. . . . . : 157.60.14.11
Subnet Mask . . . . . : 255.255.255.0
Default Gateway . . . . . : fe80::20a:42ff:feb0:5400%6
IPv4 Default Gateway . . . . . : 157.60.14.1
Tunnel adapter Local Area Connection* 6:
Connection-specific DNS Suffix . :
IPv6 Address. . . . . : 2001:db8:908c:f70f:0:5efe:157.60.14.11
Link-local IPv6 Address . . . . . : fe80::5efe:157.60.14.11%9
Site-local IPv6 Address . . . . . : fec0::6ab4:0:5efe:157.60.14.11%1
Default Gateway . . . . . : fe80::5efe:131.107.25.1%9
```

```
fe80::5efe:131.107.25.2%9
Tunnel adapter Local Area Connection* 7:
Media State . . . . . : Media disconnected
Connection-specific DNS Suffix . :
```

Obtenir un préfixe IPv6

Pour une communication indirecte, il faut compléter la configuration avec une adresse IPv6 unicast qui soit routable. Il existe deux types d'adresses qui répondent à ce critère : les adresses "unicast locales" ULA (*Unique Local Address*) [[RFC 4193](#)] et les adresses "unicast globales" GUA (*Global Unicast Address*) [[RFC 3587](#)]. Pour rappel, les différences majeures entre ces deux types d'adresses sont les suivantes :

- **Portée** : les adresses GUA sont des adresses publiques tandis que les adresses ULA sont des adresses privées. Les adresses privées ne peuvent être utilisées que pour des communications dans un intranet.
- **Routing** : Les adresses GUA peuvent être routées dans l'internet. Les adresses ULA, routables uniquement sur une topologie privative, doivent être filtrées par les routeurs en bordure de site. Les préfixes ULA ne doivent pas être annoncés ni acceptés par les routeurs inter-AS.
- **Obtention** : Un préfixe ULA est généré de manière aléatoire par l'administrateur d'un site. Le GUA est obtenu auprès d'un opérateur tiers qui gère un registre d'allocation.

Mais quelle type d'adresse routable utiliser dans un site ? Quelles sont les cas d'utilisation des adresses ULA ? Les éléments de réponses à ces questions sont abordés dans le [RFC 5375](#), qui développe les considérations à prendre en compte pour la mise en place de l'adressage unicast d'IPv6. Ainsi, il recommande un préfixe de lien de /64 pour, notamment, le bon fonctionnement de la procédure d'autoconfiguration d'adresses. Le [RFC 6177](#) discute du préfixe à allouer à un site d'extrémité. Ce préfixe peut varier de /48 à /64. Il est recommandé de donner des possibilités de sous-réseaux à l'intérieur du site, ce que ne permet pas une allocation de préfixe à /64.

Il faut tout d'abord noter que le préfixe alloué à un site est souvent très confortable au niveau du plan d'adressage. Il n'y a rien de commun avec ce qui est connu en IPv4. Lorsqu'un site obtient un préfixe /48, il peut avoir 2^{16} sous-réseaux différents et 2^{64} nœuds dans chacun de ces sous-réseaux. Même l'allocation d'un préfixe /64, qui reste problématique pour déployer des sous-réseaux, donne un nombre d'adresses disponibles qui dépasse de plusieurs ordres de grandeur le nombre de nœuds qu'il peut y avoir dans un réseau.

Préfixe ULA

Le préfixe ULA [[RFC 4193](#)] est l'équivalent, dans son usage, aux préfixes privés d'IPv4 [[RFC 1918](#)], mais quasi unique et sans registre central. Ce dernier point rend le préfixe ULA non agrégable, et donc les adresses ULA non routables sur l'internet. La caractéristique d'unicité du préfixe ULA supprime le risque de conflit entre les 2 plans d'adressage lorsque 2 sites privés fusionnent, ce qui est loin d'être le cas en IPv4.

Ce RFC propose, dans un espace réservé `fc00::/7`, de constituer, selon un algorithme, des adresses quasi uniques. Le format des adresses de type ULA est présenté dans l'activité 13. Il est rappelé que le format d'adresse ULA se compose d'un préfixe de 48 bits dont 40 bits (*Global ID*, GID) pour identifier le site. Les 40 bits du GID sont générés en utilisant une fonction de hachage (*i.e.* SHA-1) de l'heure et de l'adresse MAC de la machine, exécutant l'algorithme détaillé dans le RFC. Outre le script, sous licence libre GPL et développé par Hartmut Goebel, indiqué dans l'activité 13, il existe des sites pour générer automatiquement un préfixe ULA comme <http://unique-local-ipv6.com/> ou <http://www.kame.net/~suz/gen-ula.html>, ou bien encore celui du [SIXXS](#) qui, en plus de fournir un préfixe ULA, l'enregistre dans un registre.

Notons que les raisons conduisant à l'utilisation des adresses privées d'IPv4 ne s'appliquent plus dans le cas d'IPv6. Citons :

- **Manque d'adresses IP publiques.** Dans l'internet IPv4, la motivation principale pour l'utilisation des adresses privées est que l'espace d'adressage public n'est pas suffisant pour l'ensemble des machines. Dans le cas d'IPv6, cette motivation n'a clairement plus lieu d'être.
- **Accroître le niveau de sécurité.** L'utilisation des adresses privées dans IPv4 induit que les machines situées derrière un NAT sont plus difficilement accessibles de l'extérieur par un unique effet de bord. Cela rend les machines derrière le NAT moins vulnérables aux attaques extérieures. Certains estiment donc que les adresses GUA exposent les machines directement aux attaquants de l'internet et trouvent là une justification à l'utilisation d'adresses privées. On notera que cet argument est fallacieux car, avec un adressage privé, il faut malgré tout utiliser un pare-feu pour prévenir les attaques, ce qui montre que la sécurisation n'est pas une question de type d'adresse publique ou privée. Donc, une simple règle sur un pare-feu pour interdire l'ouverture de connexion depuis l'extérieur peut fournir le même niveau de sécurité qu'un NAT.
- **Facilité de déploiement.** L'accès Internet, pour un site avec un adressage ULA, nécessite un NAT66 dénommé aussi NPTv6 (*Network Prefix Translation*) [[RFC 6296](#)] pour le changement d'adresses ULA en GUA. En plus de l'achat et de la maintenance de cet équipement, ce sont certaines tares du NAT qui reviennent dans le réseau IPv6 [[RFC 5902](#)]. L'usage d'ULA dans le cas d'un accès Internet n'économisera pas l'obtention d'un préfixe GUA (pour l'extérieur du NAT). Au final, un réseau basé sur les adresses ULA introduit un travail plus complexe et plus important qu'un équivalent GUA.

Aussi, les seuls cas où l'utilisation des adresses ULA est réellement motivée sont les réseaux de tests (enseignement, bancs d'essais, déploiement de prototype) et les réseaux nécessitant un niveau de sécurité très élevé par un isolement complet, comme les réseaux tactiques ou d'hôpitaux. Le [RFC 6296](#) propose une autre utilisation d'un plan d'adressage construit sur un préfixe ULA. Pour des sites de taille petite ou moyenne, un préfixe ULA couplé à un NAT66, offre une solution simple pour changer d'opérateur ou pour gérer la multi-domiciliation sans nécessiter un préfixe PI (*Provider Independent*). Ainsi, en cas de changement de fournisseur d'accès, la renumérotation n'impactera que le NAT. Les adresses ULA forment ainsi une sorte de substitut aux adresses PI. Cette idée peut avoir un sens tant que des mécanismes simples de renumérotation du réseau ne seront pas effectifs [[RFC 7010](#)]. Cette question de la

renumérotation n'est pas une question simple [[RFC 5887](#)]. Dans tous les autres cas, les adresses GUA sont plus faciles à déployer et à administrer. C'est aussi le conseil donné par l'auteur de cette note [[6](#)].

Préfixe GUA

Pour rappel, les préfixes GUA sont sous l'autorité de l'IANA [[7](#)] qui délègue aux RIR (*Regional Internet Registry*) l'allocation. Les RIR délèguent eux-mêmes aux NIR (*National Internet Registry*) puis aux LIR (*Local Internet Registry*) et/ou finalement aux FAI. En Europe, le RIR est le [RIPE-NCC](#). Il délègue directement aux FAI/LIR sans passer par des NIR. Les LIR et certains FAI se voient déléguer des préfixes /32. Ils ont obligation d'allouer les blocs IPv6 à des utilisateurs finaux tels que des organismes ou des FAI. Le RIPE-NCC ne prévoit pas de recommandation sur la taille des préfixes alloués par les LIR aux FAI.

Le préfixe GUA peut être alloué par un FAI, par un LIR ou par un RIR. Le choix s'effectue selon le type de préfixe à détenir. Si le préfixe est destiné à un site, on parlera d'un préfixe PA (*Provider Assigned* ou *Provider Aggregatable*) ; si le site est multidomicilié, il faut un préfixe dit PI (*Provider Independent*).

Le préfixe de type PA est attribué par le FAI/LIR. Il n'y a pas de formalités particulières à remplir. Le préfixe est alloué en même temps que la connectivité. Le préfixe est donc spécifique à un site et associe ce site à un opérateur. Ce dernier assure les services suivants :

- allocation du préfixe à l'organisme ;
- transport du trafic de l'utilisateur ;
- annonce d'un préfixe BGP dans lequel est inclus celui du site.

La taille du préfixe alloué varie selon les opérateurs. Certains donneront un /52, voire un /60. Le préfixe alloué est au maximum /64. Si un site doit avoir un préfixe de moins de 48 bits, la demande doit être motivée. Si le FAI change, il faut rendre le préfixe et renuméroter le réseau du site, et cette action est pénible [[RFC 5887](#)]. Pour éviter ce désagrément, il est possible de demander un préfixe PI auprès d'un RIR. Ce type de préfixe est une nécessité pour les sites multidomiciliés ou pour les sites qui doivent changer de FAI sans changer d'adresses. La demande de préfixe doit être faite directement à RIPE-NCC qui attribue un préfixe /48 ou un préfixe de longueur inférieure si la demande est motivée. Il faut que l'organisation qui en fait la demande soit membre de RIPE ou que la demande soit parrainée par un FAI/LIR membre de RIPE. Il est ensuite nécessaire que les FAI annoncent et routent le préfixe PI.

À noter que si un FAI ne propose pas IPv6, il est possible d'utiliser un service de tunnels. Certains d'entre eux (e.g. Hurricane Electric) attribuent gratuitement un préfixe /48 lors de l'établissement d'un tunnel.

Définition du plan d'adressage de sous-réseau avec IPv6

Les préfixes alloués dans la majorité des cas laissent de nombreux bits pour gérer les liens à l'intérieur d'un site. Lorsque le préfixe alloué au site est un /48, le SID (*Subnet Identifier*) est codé sur 16 bits. Il est évident que la structuration du plan d'adressage est radicalement différente selon que l'on soit en IPv4 ou en IPv6. En IPv4, l'essentiel du travail sur l'adressage a

pour but d'économiser les quelques adresses disponibles, pour pouvoir fonctionner malgré la pénurie. En IPv6, ce problème disparaît et la définition du plan d'adressage vise la facilité de son administration tout en rendant l'agrégation de routes efficace. La mise en œuvre des politiques de sécurités doit aussi être prise en compte dans la définition du plan d'adressage interne. Dans l'article[8], l'auteur montre comment ces critères doivent servir à guider la définition d'un plan d'adressage pour un site. Comme nous l'avons vu dans l'activité 16, il est possible de structurer le routage interne de plusieurs manières :

- reproduire le schéma IPv4 déjà déployé. Ainsi, par exemple, le préfixe privé ([RFC 1918](#)) 10.0.0.0/8 offre 24 bits d'identification locale à l'administrateur pour la structuration des sous-réseaux. En pratique, sur cet exemple, les plus petits sous-réseaux ont rarement des préfixes supérieurs à /24, ce qui laisse 16 bits (24 - 8) pour la structuration. Dans ce cas, il est donc possible de reproduire le plan d'adressage privé IPv4 à l'aide des 16 bits du SID ;
- numéroter de manière incrémentale les sous-réseaux (e.g. 0001,0002,0003...). Simple à mettre en œuvre, cette technique peut cependant conduire à un adressage plat et difficile à mémoriser. Elle peut également complexifier l'écriture des règles de filtrage ainsi que l'agrégation ;
- Utiliser le numéro de VLAN, ce qui est tout à fait possible puisque le VLAN ID n'occupe que 12 bits. Cette méthode permet d'éviter de mémoriser plusieurs niveaux de numérotation ;
- séparer les types de réseaux et utiliser les chiffres de gauche pour les désigner. D'autres niveaux de structuration peuvent être définis sur les bits restant. Cette technique permet de faciliter les règles de filtrage, tout en utilisant des règles appropriées à la gestion de ces sous-réseaux pour la partie de droite. À titre d'exemple, le tableau 1 contient le plan de numérotation d'une université localisée sur plusieurs sites prenant en compte les différentes communautés d'utilisateurs. Ainsi, le préfixe :
 - 2001:db8:1234::/52 servira pour la création de l'infrastructure, donc en particulier les adresses des interfaces des routeurs prises dans cet espace ;
 - 2001:db8:1234:8000::/52 servira pour le réseau Wi-Fi des invités ; la manière dont sont gérés les 12 bits restants du SID n'est pas spécifiée ;
 - 2001:db8:1234:E000::/52 servira pour le réseau des étudiants. L'entité représente la localisation géographique du campus. Dans chacun de ces campus, il sera possible d'avoir jusqu'à 16 sous-réseaux différents pour cette communauté.

| Communauté | 4 bits | 8 bits | 4 bits |
|----------------|--------|-----------------------|--------|
| Infrastructure | 0 | valeurs spécifiques | |
| Tests | 1 | valeurs spécifiques | |
| Tunnels | 6 | allocation de /60 aux | |

| | | | |
|---------------|---|---------------------|--------------|
| | | utilisateurs | |
| Invités Wi-Fi | 8 | valeurs spécifiques | |
| Personnels | a | Entité | sous-réseaux |
| Étudiants | e | Entité | sous-réseaux |
| Autre | f | valeurs spécifiques | |

Tableau 1 : Exemple de découpage du SID

Déploiement des équipements en double pile

Les services indispensables au fonctionnement d'un réseau doivent être déployés et ceux existants doivent intégrer IPv6 ; par exemple, la configuration d'adresse (DHCP / SLAAC), le nommage (DNS) et l'administration de l'infrastructure (supervision, sécurité et métrologie). Cette section traite des problématiques liées à leur configuration.

Un hôte en double pile présente une interface réseau de la manière suivante dans un environnement Unix :

```
eth0: flags=8843 mtu 1500
inet 192.108.119.134 netmask 0xffffffff broadcast 192.108.119.255
inet6 2001:db8:1002:1:2b0:d0ff:fe5c:4aee/64
inet6 fe80::2b0:d0ff:fe5c:4aee/64
ether 00:b0:d0:5c:4a:ee
media: 10baseT/UTP
supported media: autoselect 100baseTX
```

Notons qu'un réseau peut être entièrement en double pile ou partiellement, à condition que les segments IPv4 soient masqués par des tunnels dans lesquels IPv6 est encapsulé dans IPv4. Tous les équipementiers de cœur de réseau supportent ces mécanismes, ce qui permet rapidement d'acheminer du trafic IPv6 dans une infrastructure IPv4 existante. Lorsque le déploiement est partiel, une attention particulière doit être portée au protocole de routage utilisé, l'activation de fonctions permettant de gérer plusieurs topologies (v4 et v6) pouvant s'avérer nécessaire.

Configuration d'adresses

La configuration des interfaces réseaux en IPv6 peut s'effectuer selon plusieurs méthodes.

Avec la méthode SLAAC (*StateLess Address Auto Configuration*) [[RFC 4862](#)], l'interface génère elle-même ses adresses à partir des informations émises par le routeur local. Si SLAAC est sans doute plus simple et plus rapide à déployer, elle peut présenter des inconvénients :

- absence du DNS. SLAAC n'intègre pas de champ pour transmettre le serveur DNS local. Ce n'est pas un problème si l'adresse d'un serveur DNS est obtenue via le DHCP de

l'interface IPv4, mais cela rend donc indispensable l'existence d'une telle interface. Toutefois, le [RFC 8106](#) rend désormais possible l'ajout d'une option DNS dans les messages RA (*Router Advertisement*) ;

- absence de contrôle sur les adresses. Il n'y a pas de moyen fiable d'enregistrer l'association "adresse MAC - adresse IP". Le logiciel NDPMON (*Neighbor Discovery Protocol Monitor*) permet cependant d'écouter le réseau en permanence et de mémoriser les correspondances entre les adresses IP et MAC.

Avec DHCPv6 [[RFC 8415](#)], le client obtient son adresse et ses informations auprès du serveur DHCP. Ce dernier peut donc contrôler les informations indiquées à chaque machine, contrôler les adresses attribuées et mémoriser ces dernières. Le serveur DHCP est aussi l'endroit logique où faire des mises à jour dynamiques du DNS pour refléter les changements d'adresses IP. Comme DHCP offre davantage de contrôle que SLAAC, DHCP est en général apprécié dans les réseaux d'organisations.

Lorsque DHCP est utilisé dans sa version "sans état", comme le permet le [RFC 8415](#), il sert à distribuer uniquement des paramètres statiques, comme les adresses des serveurs de noms. Dans cette situation, la méthode SLAAC est utilisée pour allouer les adresses et le nœud doit récupérer les informations manquantes à sa configuration par le serveur DHCP "sans état".

Lors du déploiement de DHCPv6 en double pile, l'inconvénient majeur va être la gestion des informations recueillies via des sources différentes. Ce problème bien connu est notamment décrit dans le [RFC 4477](#). En effet, des informations pouvant être reçues à la fois du DHCPv4 et du DHCPv6, il peut y avoir incohérence. Par exemple, des informations relatives à la pile IPv6 renseignées manuellement dans la configuration de l'OS (e.g. `/etc/resolv.conf`) peuvent être effacées par le client DHCPv4. Le client doit savoir s'il doit utiliser les informations les plus récentes ou fusionner ces informations selon des critères bien précis. Ce problème est encore plus prononcé si les réseaux IPv6 et IPv4 n'ont pas les mêmes administrateurs.

Résolution d'adresses

Les points importants relatifs au DNS (*Domain Naming System*) dans le déploiement d'IPv6 sont présentés dans le [RFC 4472](#). Pour IPv6, le DNS est d'autant plus indispensable que les adresses sur 128 bits ne sont pas simples à lire ni à mémoriser. Le DNS est utilisé pour associer les noms avec les adresses IP. Un nouvel enregistrement (*resource record*) appelé AAAA a été défini pour les adresses IPv6 [[RFC 3596](#)]. Les "résolveurs" DNS (clients du DNS) doivent être capables d'interpréter les enregistrements A pour IPv4 et les enregistrements AAAA pour IPv6. Lorsque les deux types sont retournés par le serveur DNS, le "résolveur" doit trier l'ordre des enregistrements retournés de manière à favoriser IPv6. Par ailleurs, le client (de la couche application) doit pouvoir spécifier au "résolveur" s'il souhaite obtenir les entrées de type A ou AAAA.

Administration du réseau

Il est indispensable que IPv6 et IPv4 soient isofonctionnels. Pour ce faire, il faut maîtriser les outils d'administration réseau IPv6 et en particulier s'assurer du bon fonctionnement des services et équipements IPv6.

L'administration d'un réseau peut se décomposer en trois tâches : la supervision, la métrologie et la sécurité. Les pare-feux sont depuis longtemps capables d'appliquer leurs règles de filtrage au trafic IPv6. Il est à noter que les mécanismes de chiffrement et les certificats n'ont pas été impactés par IPv6. Les outils de métrologie sont généralement assez faciles à adapter à IPv6 puisqu'il y a peu de dépendance entre les logiciels.

La difficulté principale réside dans les outils de supervision. Le protocole de supervision SNMP sert à collecter dans des bases de données appelées MIB (*Management Information Base*) diverses informations qui sont stockées sur les équipements réseaux. Net-SNMP intègre IPv6 depuis 2002. Cette intégration était nécessaire pour interroger les nœuds uniquement IPv6. Cette intégration d'IPv6 n'était pas indispensable dans le cas d'un réseau double pile puisqu'il est possible d'interroger un équipement via SNMP depuis son interface IPv4. L'évolution des MIB a été beaucoup plus délicate mais elle est achevée et le [RFC 4001](#) prévoit que l'adresse IP soit de longueur variable et constituée de deux champs, un pour identifier le type d'adresse et un pour l'adresse elle-même.

Les principales solutions de supervision (e.g. Nagios) et équipementiers supportent désormais largement IPv6. Il faut malgré tout s'assurer que l'ensemble des outils utilisés dans le cadre de SNMP supportent la version unifiée et modifiée de la MIB.

Déploiement d'IPv6 pour les services

Les adresses IPv4 imbriquées dans une adresse IPv6

Les premières adresses IPv4 imbriquées dans une adresse IPv6 ont été décrites dès les premières spécifications des mécanismes d'interopérabilité, dont certains ont depuis été officiellement dépréciés. Parmi ces adresses historiques nous trouvons :

- **adresse IPv4 compatible** (*IPv4-Compatible IPv6 address* [RFC 4213](#), [RFC 3513](#))
::a.b.c.d/96 ou ::xxxx:xxxx/96. Ces adresses ont été dépréciées par le [RFC 4291](#).
- **« IPv4 mappées »** (*IPv4-mapped IPv6 address* [RFC 4291](#)) ::ffff:a.b.c.d/96 ou ::ffff:xxxx:xxxx/96. Ces adresses font référence à un nœud supportant uniquement IPv4.
- **« IPv4 traduites »** (*IPv4-translated IPv6 address* [RFC 7915](#))
::ffff:0:a.b.c.d/96 ou ::ffff:0:xxxx:xxxx/96. Ces adresses référençaient dans l'espace v4 un nœud uniquement v6, dans le cadre du protocole de traduction sans état entre IPv4 et IPv6 (IP/ICMP Translation Algorithm SIIT, [RFC 7915](#)). Elles se distinguent des « IPv4 mappées » par un décalage à gauche de 16 bits du mot f f f f.

Les préfixes de ces adresses sont composés de mots nuls ou tout à 1 (: f f f f :), ce qui les rend neutres vis-à-vis du calcul du *checksum* intégrant le pseudo-entête (cf. séquence 3).

Les longs préfixes nuls de ces adresses les rendent difficilement routables sur le réseau. Ces adresses sont cependant adaptées pour les interfaces logiques internes aux machines double

pile (*dual-stack*). Les adresses « IPv4 mappées » sont par exemple utilisées pour aiguiller les flux vers la pile IPv4, dans le cadre d'applicatifs conformes IPv6 hébergés sur des machines double pile.

Au niveau des applications

La version de protocole IP utilisée doit être transparente au niveau de l'application et cela ne doit rien changer. Il faut cependant que l'application puisse exprimer l'adresse de son correspondant, que ce soit en IPv4 ou en IPv6. Pour cela, les adresses doivent être codées sur 128 bits. Un type d'adresse IPv6 a été défini à cet usage, à savoir comporter l'adresse IPv4 d'une communication IPv4 (*IPv4 mapped IPv6 address*, « IPv4 mappées »). L'adresse IPv4 est imbriquée dans une adresse IPv6 comme le montre la figure 4. Le format des adresses IPv4 imbriquées est `::ffff:`, comme par exemple `::ffff:192.0.2.1` (affichée `::ffff:c000:201`). Avec ce type d'adresse, l'espace d'adressage IPv4 est vu comme une partie de l'espace d'adressage IPv6.

tolérance de notation (rappel)

Lorsque l'adresse IPv4 occupe la partie basse de l'adresse IPv6, les 32 bits de poids faible (bits 97 à 128), la notation décimale pointée traditionnelle d'IPv4 est tolérée. Ainsi, l'adresse `2001:db8:900d:cafe::c0a8:a05` peut être notée `2001:db8:900d:cafe::192.168.10.5` lors d'une saisie (configuration manuelle d'interface ou passage de paramètre en ligne de commande...). Cependant, elle sera affichée sous sa forme canonique ([RFC 5952](#)) `2001:db8:900d:cafe::c0a8:a05` dans le journal de bord (*log system*) de la machine. Dans ce cas, si la saisie peut nous sembler familière, la correspondance entre l'adresse IPv6 et l'adresse IPv4 embarquée est moins évidente à l'affichage.

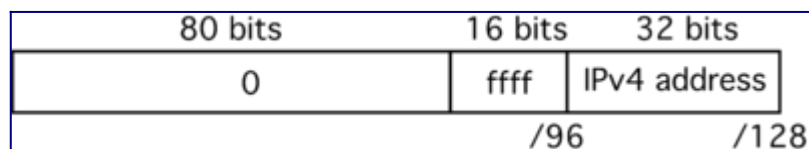


Figure 4 : Adresse IPv4 imbriquée dans une adresse IPv6.

Quand la pile IPv4 d'un équipement reçoit un paquet et qu'une application utilise le format d'adresse d'IPv6, les adresses IPv4 imbriquées "source" et "destination" sont construites à partir des informations contenues dans l'en-tête du paquet. Réciproquement, quand une application émet des paquets avec des adresses IPv4 imbriquées, ceux-ci sont aiguillés vers la pile IPv4.

L'exemple suivant illustre ce fonctionnement. Le client Telnet compilé en IPv6 et fonctionnant sur une machine double pile peut contacter les équipements IPv4 en utilisant leur adresse IPv4 mais, bien sûr, les équipements IPv6 avec leur adresse IPv6.

```
>telnet rhadamanthe
Trying 2001:db8:1002:1:2b0:d0ff:fe5c:4aee...
Connected to rhadamanthe.ipv6.rennes.enst-bretagne.fr.
Escape character is '^]'.

FreeBSD/i386 (rhadamanthe.ipv6.rennes.enst-br) (ttyp3)
```

```
login:^D
>telnet bloodmoney
Trying ::ffff:193.52.74.211...
Connected to bloodmoney.rennes.enst-bretagne.fr.
Escape character is '^]'.

SunOS UNIX (bloodmoney)

login:
```

Nous venons de le voir : une application compatible IPv6 peut dialoguer indifféremment en IPv4 et en IPv6, alors qu'une application utilisant un format d'adresse IPv4 restera limitée à ce protocole. Ceci ramène au problème du développement du code lié à la communication des applications. Plus généralement, le développement d'applications *IPv6 compatible* demande de nouvelles méthodes et pratiques au niveau de la programmation du fait du changement de la longueur de l'adresse IP, de la suppression de la diffusion d'IPv4[9]. Pour rendre une application "IPv6 compatible", il faut qu'elle soit compilée ou recompilée avec l'interface de programmation (API) IPv6 ou, pour les applications écrites avec un langage de haut niveau d'abstraction, que la bibliothèque intègre IPv6. Ceci n'est bien sûr possible que sur les équipements pourvus d'un système ayant une pile IPv6, ce qui est aujourd'hui vrai dans la quasi-totalité des cas. Reste le problème des applications non recompilables (code source non disponible) : ce genre de situation est traité par la suite dans l'activité de traduction.

Devant le coût des développements, la problématique de la compatibilité des applications à IPv6 doit être traitée dès le début, dans la stratégie de migration vers IPv6.

Problèmes liés au déploiement d'IPv6

L'intégration d'IPv6 devrait être indolore. L'utilisateur ne devrait pas voir de différence lorsqu'il accède à un service en IPv6. Cependant, en l'absence d'un minimum de précaution, ce souhait peut ne pas être satisfait, et le déploiement d'IPv6 en double pile peut dégrader le fonctionnement des services. Nous allons voir quels sont les problèmes engendrés au niveau du service perçu et comment les prévenir.

Le premier problème porte sur la phase d'établissement de la connexion comme expliqué par cet article[10]. Pour l'illustrer, prenons un service "monservice.org" accessible aux adresses IPv4 et IPv6 comme représenté sur la figure 5. L'application du client demande au "résolveur" DNS la liste des adresses IP pour joindre "monservice.org", et ce dernier retourne une adresse IPv6 et une adresse IPv4. Conformément aux préconisations du [RFC 6724](#), la connexion commence avec l'adresse IPv6. Si la connexion IPv6 échoue, une autre adresse, potentiellement en IPv4, est essayée. Si le service est accessible sur une des adresses retournées par le DNS, le client finira par établir une connexion au service. L'inconvénient de cette méthode est que les tentatives de connexion sont bloquantes et donc effectuées de manière séquentielle. Le délai d'attente pour considérer qu'une connexion a échoué est de l'ordre de plusieurs dizaines de secondes.

Dans l'état actuel du déploiement d'IPv6, bien des sites ont une connexion IPv6 totalement ou

partiellement inopérante. Si un serveur fonctionne en IPv4 et en IPv6, et que son client n'a qu'IPv4, il n'y aura pas de problème. Mais si le client a IPv6, tente de l'utiliser, mais que sa connectivité IPv6 est plus ou moins défectueuse, il aura des temps de réponse très importants. Les utilisateurs percevront le service comme très dégradé. C'est la raison pour laquelle, encore aujourd'hui, il y a si peu de sites Internet accessibles en IPv6.

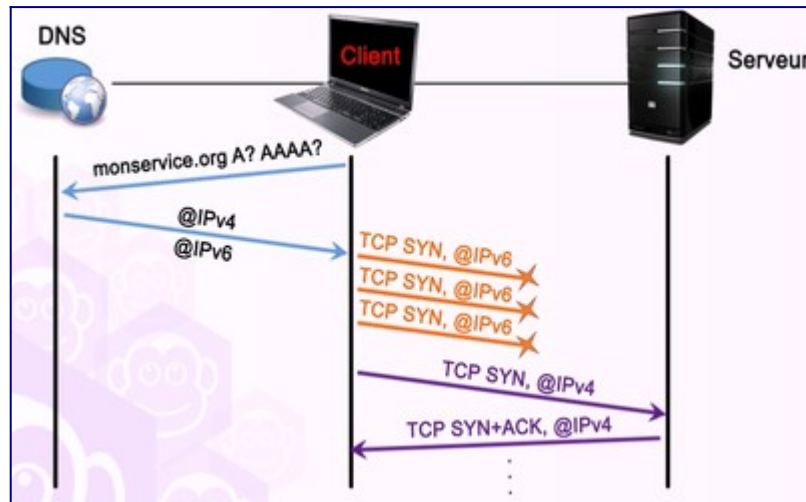


Figure 5 : Établissement de connexion d'un client en double pile.

Le second problème est relatif à la taille des paquets IPv6, comme montré dans cet article [\[11\]](#). Une fois la connexion établie en IPv6, l'utilisateur peut rencontrer des problèmes pour les échanges avec le serveur. En effet, en raison de l'utilisation de tunnels, IPv6 présente un problème de MTU bien plus souvent que IPv4. Le lien « standard » sur Internet a une MTU de 1500 octets, héritée d'Ethernet. Si, de bout en bout, tous les liens ont cette MTU, la machine émettrice peut fabriquer des paquets de 1500 octets et ils arriveront intacts. Mais, s'il y a sur le trajet un tunnel qui réduit la MTU, le problème de MTU peut se produire, comme la figure 6 le représente. Le problème de MTU se manifeste par le fait que les paquets de petite taille, tels ceux utilisés lors de l'établissement de la connexion, passent, mais les gros paquets, comme les transferts de fichiers avec HTTP, bloquent mystérieusement. Les paquets dépassant la MTU du chemin ne sont jamais remis à la destination. Si les messages ICMP avertissant de ce problème sont bloqués par un routeur sur le chemin, la source n'apprendra pas le problème et ne pourra donc pas s'adapter. La connexion va finalement se fermer pour cause d'inactivité (aucune réception n'est faite). Ce problème est assez sérieux dans l'Internet et a fait l'objet du [RFC 4459](#). Dans l'article [\[11\]](#), le problème de MTU est détaillé et illustré par des captures de traces.

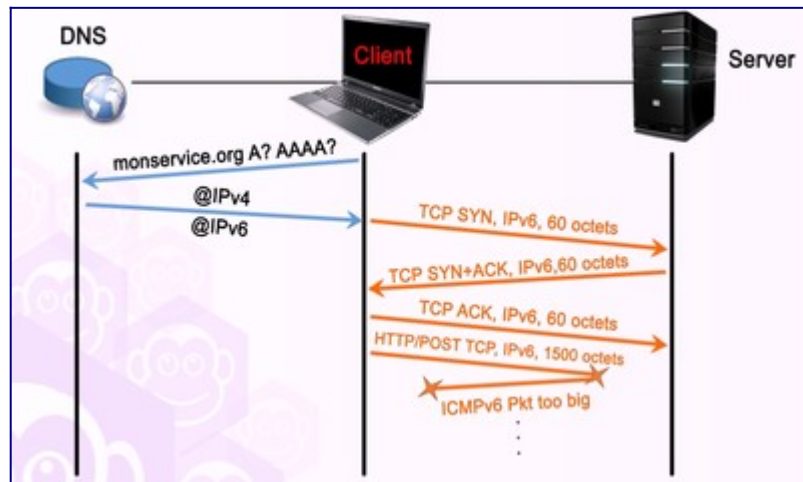


Figure 6 : Le problème de MTU.

Le troisième problème porte sur la performance perçue pour un service reposant sur la connectivité IPv6. Celle-ci sera évaluée comme dégradée à l'image de l'interactivité. La connectivité IPv6 est souvent constituée de tunnels. Si les sorties des tunnels sont trop éloignées du point d'entrée, le temps de réponse peut significativement augmenter et dépasser les valeurs souhaitables pour les applications interactives (ToIP, vidéoconférence, jeux en ligne...) et même pour le Web. L'utilisateur verra alors sa qualité de service chuter par rapport au réseau simple pile IPv4 et ce, même si la connectivité IPv6 est parfaitement fonctionnelle. Ce problème de délai important en IPv6 est illustré par la figure 7 dans laquelle le temps de réponse (noté RTT *Round Trip Time*) est plus long en IPv6 du fait d'un chemin plus long en terme de nœuds de commutation et en distance.

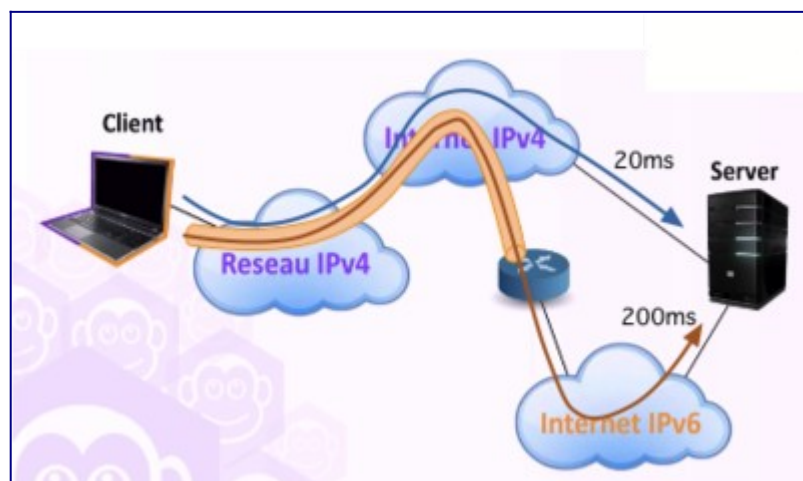


Figure 7 : Illustration des délais importants en IPv6.

Des solutions ont été proposées pour éviter que les utilisateurs désactivent IPv6 en réponse à la baisse de performance qu'ils observent. Il est ici intéressant de noter que les problèmes que nous venons de décrire trouvent leur origine dans l'utilisation d'IPv4 dans la connectivité IPv6. La bonne solution serait de généraliser IPv6 pour un usage sans IPv4. En attendant, les solutions proposées sont détaillées par la suite afin qu'IPv6 fonctionne aussi bien qu'IPv4.

Les problèmes qui apparaissent lors de la phase d'établissement de la connexion sont dus au fait que le client tente de se connecter séquentiellement aux différentes adresses du service.

IPv6 étant testé en premier lieu, il faut attendre que la tentative de connexion échoue, ce qui peut prendre plusieurs secondes. Le [RFC 8305](#) propose d'essayer d'établir une connexion TCP à la fois en IPv4 et en IPv6 et de conserver la première connexion établie. Le RFC précise que les demandes de connexion doivent être émises de sorte que ce soit celle portée par IPv6 qui puisse être conservée. Les navigateurs Web ont pris en compte ces recommandations mais les mises en œuvre divergent comme le rapporte l'article [\[12\]](#):

- Le navigateur Safari conserve, dans une table, le délai moyen pour atteindre chaque adresse du serveur. L'adresse ayant le délai le plus court est utilisée en priorité, mais si elle ne répond pas avant le délai attendu, l'adresse suivante est essayée. La demande de connexion est émise en décalé sur les différentes adresses du serveur. La première connexion établie sera utilisée pour la suite des échanges. Cette solution peut cependant induire un délai non négligeable si le serveur comporte de nombreuses adresses et que seule la dernière (celle de plus long délai moyen) est accessible.
- Le navigateur Chrome mesure les délais pour l'obtention des adresses IPv4 et IPv6 via le DNS. Il tente d'établir une connexion avec le protocole dont l'adresse a été obtenue en premier. Notons que pour maximiser les chances de réussite, il envoie deux segments SYN en parallèle avec des ports "source" différents. Si aucun segment SYN + ACK n'est reçu après 250 ms, un dernier segment SYN est émis depuis un troisième port. Si aucun segment SYN + ACK n'est reçu après un total de 300 ms, le protocole suivant sera essayé. Dans le cas où un problème apparaît avec un seul des protocoles, le délai est donc au maximum allongé de 300 ms. Si un problème apparaît avec les deux protocoles, c'est la méthode par défaut de l'OS qui sera utilisée. Notons que si le RTT est supérieur à 300 ms, les deux protocoles seront systématiquement utilisés.
- Le navigateur Firefox implémente strictement les recommandations du [RFC 8305](#) et essaye les deux protocoles en parallèle.

Des mises en œuvre similaires à celles des navigateurs sont à développer pour les clients des différentes applications (e.g. mail, VoIP, chat...). Pour ne pas avoir les inconvénients des accès séquentiels, il faudrait ne pas attendre l'expiration des temporisateurs de l'OS, mais choisir des temps de garde plus agressifs et ayant moins d'impact pour les utilisateurs. Par exemple, si IPv6 ne répond pas avant un délai de 300 ms ou deux RTT, alors IPv4 est essayé.

Notons cependant que le parallélisme a un effet pervers pour les opérateurs. En effet, l'utilisation des CGN pour la connectivité IPv4 leur est coûteuse et le maintien des états relatifs à l'ouverture de chaque connexion consomme des ressources. En suggérant l'ouverture de plusieurs connexions en parallèle, le [RFC 8305](#) va à l'encontre des intérêts des opérateurs et potentiellement des utilisateurs si les CGN sont saturés. C'est pourquoi, il suggère d'essayer en priorité le protocole qui ne générera pas d'état dans le réseau, à savoir IPv6.

Pour les problèmes de MTU, la solution réside dans le fait de forcer les utilisateurs à choisir une faible MTU, par exemple 1400 octets, dans l'espoir qu'il n'y ait pas un lien sur la route dont la MTU soit inférieure à cette valeur. Cela peut être fait lors de la configuration de l'interface réseau ou lors de l'établissement d'une connexion TCP en réduisant la taille maximum des segments autorisée. Cette réduction est effectuée par le routeur (*MSS clamping*). Dans le [RFC](#)

[4821](#), les auteurs proposent une solution qui ne repose pas sur ICMP. L'idée consiste à ce que TCP relève la taille des segments perdus. Si ce sont les segments de grande taille, TCP diminue la MSS (*Maximum Segment Size*) de lui-même (et, par voie de conséquence, la valeur de la MTU). Le [RFC 8899](#) étend cette technique à d'autres protocoles de transport que TCP et SCTP.

Les problèmes de performance en termes de délai sont dus à l'utilisation de tunnels. La solution réside dans la sélection de points de sorties plus proches pour les tunnels. Au moment de la rédaction de ce document, le problème de délai n'a pas de solution (au niveau application) faisant l'objet d'une recommandation similaire à celle du [RFC 8305](#).

Conclusion

Le mécanisme de double pile permet de résoudre les craintes liées à la migration vers IPv6. Dès lors, il ne s'agit plus d'une migration mais d'une intégration de IPv6 dans le réseau existant. Le réseau IPv4 reste pleinement fonctionnel et l'intégration d'IPv6 ne risque pas de compromettre le bon fonctionnement des services déployés. En effet, quand cela est possible, la communication se fait en utilisant la nouvelle version du protocole. Dès qu'un des éléments n'est pas compatible (réseau, système d'exploitation, application), le protocole IPv4 est utilisé. Le principal intérêt réside dans l'adaptation progressive de son système d'information et de son personnel à IPv6.

Notons que le déploiement double pile ne doit être que transitoire car il ne résout pas le problème de la pénurie d'adresses puisque chaque machine doit disposer d'une adresse IPv4 et d'une adresse IPv6. Cela complique aussi les mécanismes de configuration automatique et augmente la charge pour l'administrateur réseau. Lors de l'activation d'IPv6 pour un service existant en IPv4, il faut prendre des précautions afin que la qualité perçue par l'utilisateur ne soit pas dégradée.

Références bibliographiques

1. ↑ Botzmeyer, S. (2006). [Programmer pour IPv6 ou tout simplement programmer à un niveau supérieur ?](#)
2. ↑ Matthews, P. Kuarsingh, V. (2015). Internet-Draft. [Some Design Choices for IPv6 Networks](#)
3. ↑ Cisco. (2011). White paper. [Solution Overview—Getting Started with IPv6](#)
4. ↑ RIPE documents. (2012). [Requirements for IPv6 in ICT Equipment](#)
5. ↑ Marsan, C.D. (2010). Network World. [U.S. military strong-arming IT industry on IPv6](#)
6. ↑ Horley, E. (2013) [IPv6 Unique Local Address or ULA - what are they and why you shouldn't use them](#)
7. ↑ IANA. [IPv6 Global Unicast Address Assignments](#)
8. ↑ Rooney, T. (2013). Deploy 360 Programme. Internet Society. [IPv6 Address Planning: Guidelines for IPv6 address allocation](#)
9. ↑ Cisco. (2011); White paper. [IPv6 and Applications](#)
10. ↑ Bortzmeyer, S. (2011). [Le bonheur des globes oculaires \(IPv6 et IPv4\)](#)

- 11.↑ [11.0 11.1](#) Huston, G. (2009). The ISP Column. [A Tale of Two Protocols: IPv4, IPv6, MTUs and Fragmentation](#)
- 12.↑ Huston, G. (2012). The ISP Column. [Bemused Eyeballs: Tailoring Dual Stack Applications for a CGN Environment](#)

Pour aller plus loin

Scénarios de déploiement :

- Guide de déploiement d'IPv6 par RIPE: [Deploy IPv6 Now](#)
- [Deploying IPv6 in the Home and Small Office/Home Office \(SOHO\)](#)

Sécurité :

- Bortzmeyer, S. (2013). [Exposé sur la sécurité d'IPv6 à l'ESGI](#)
- Cisco White paper (2011). [IPv6 Security Brief](#)

Pour développer des applications compatibles avec IPv6 :

- [Livre blanc ARIN](#)
- Cisco. White Paper. [IPv6 and Applications](#)
- Bortzmeyer, S. (2013) [Lier une prise à IPv6 seulement ou bien aux deux familles, v4 et v6 ?](#)

RFC et leur analyse par S. Bortzmeyer :

- [RFC 1918](#) Address Allocation for Private Internets
- [RFC 3587](#) IPv6 Global Unicast Address Format
- [RFC 3596](#) DNS Extensions to Support IP Version 6
- [RFC 4001](#) Textual Conventions for Internet Network Addresses [Analyse](#)
- [RFC 4038](#) Application Aspects of IPv6 Transition
- [RFC 4057](#) IPv6 Enterprise Network Scenarios
- [RFC 4193](#) Unique Local IPv6 Unicast Addresses [Analyse](#)
- [RFC 4213](#) Basic Transition Mechanisms for IPv6 Hosts and Routers [Analyse](#)
- [RFC 4459](#) MTU and Fragmentation Issues with In-the-Network Tunneling [Analyse](#)
- [RFC 4472](#) Operational Considerations and Issues with IPv6 DNS [Analyse](#)
- [RFC 4477](#) Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP): IPv4 and IPv6 Dual-Stack Issues
- [RFC 4821](#) Packetization Layer Path MTU Discovery [Analyse](#)
- [RFC 4861](#) Neighbor Discovery for IP version 6 (IPv6) [Analyse](#)
- [RFC 4862](#) IPv6 Stateless Address Autoconfiguration [Analyse](#)
- [RFC 5211](#) An Internet Transition Plan [Analyse](#)
- [RFC 5375](#) IPv6 Unicast Address Assignment Considerations [Analyse](#)
- [RFC 5887](#) Renumbering Still Needs Work [Analyse](#)
- [RFC 5902](#) IAB thoughts on IPv6 Network Address Translation [Analyse](#)

- [RFC 6018](#): IPv4 and IPv6 Greynets [Analyse](#)
- [RFC 6092](#) Recommended Simple Security Capabilities in Customer Premises Equipment for Providing Residential IPv6 Internet Service [Analyse](#)
- [RFC 6104](#) Rogue IPv6 Router Advertisement Problem Statement [Analyse](#)
- [RFC 6164](#) Using 127-Bit IPv6 Prefixes on Inter-Router Links [Analyse](#)
- [RFC 6177](#) IPv6 Address Assignment to End Sites
- [RFC 6180](#) Guidelines for Using IPv6 Transition Mechanisms during IPv6 Deployment [Analyse](#)
- [RFC 6296](#) IPv6-to-IPv6 Network Prefix Translation
- [RFC 6724](#) Default Address Selection for Internet Protocol version 6 (IPv6) [Analyse](#)
- [RFC 7010](#) IPv6 Site Renumbering Gap Analysis [Analyse](#)
- [RFC 7084](#) Basic Requirements for IPv6 Customer Edge Routers [Analyse](#)
- [RFC 7113](#) Implementation Advice for IPv6 Router Advertisement Guard (RA-Guard) [Analyse](#)
- [RFC 7123](#) Security Implications of IPv6 on IPv4 Networks [Analyse](#)
- [RFC 7381](#) Enterprise IPv6 Deployment Guidelines [Analyse](#)
- [RFC 7707](#) Network Reconnaissance in IPv6 Networks [Analyse](#)
- [RFC 7915](#) IP/ICMP Translation Algorithm [Analyse](#)
- [RFC 8106](#) IPv6 Router Advertisement Options for DNS Configuration [Analyse](#)
- [RFC 8305](#) Happy Eyeballs Version 2: Better Connectivity Using Concurrency [Analyse](#)
- [RFC 8415](#) Dynamic Host Configuration Protocol for IPv6 (DHCPv6) [Analyse](#)
- [RFC 8899](#) : Packetization Layer Path MTU Discovery for Datagram Transports [Analyse](#)
- [RFC 8981](#) Temporary Address Extensions for Stateless Address Autoconfiguration in IPv6

[Analyse](#)

Présentations sur le déploiement d'IPv6 :

- Scott Hogg (2015) Keynote in Nanog. [Successfully Deploying IPv6](#)
- Leslie Nobile, Mark Kosters. (2015) Keynote in Nanog. [Moving to IPv6](#)
- Huston, G (2010) [An Economic Perspective on the Transition to IPv6](#)
- Cisco (2005) [Enterprise IPv6 Deployment](#)

Activité 42 : Établir la connectivité en IPv6

Problématique

Lorsqu'un réseau IPv6 veut joindre un autre réseau IPv6 séparé par un réseau en IPv4, le problème consiste à offrir une connectivité IPv6 entre ces deux réseaux. La bonne solution serait de les interconnecter avec IPv6 uniquement, c'est-à-dire sans avoir recours à IPv4. Mais, quand cela n'est pas possible, la connectivité s'établit par des mécanismes de niveau réseau reposant sur le principe du tunnel. Ainsi, le tunnel est la solution pour utiliser une infrastructure IPv4 existante pour acheminer du trafic IPv6[1].

Les tunnels peuvent s'utiliser aussi bien pour la connectivité d'un site IPv6 avec l'internet v6 (si le FAI n'offre pas encore nativement cette connectivité) que pour l'intérieur d'un site en IPv4 si celui-ci comporte des parties en IPv6 non connexes. Par la suite, nous allons décrire le fonctionnement d'un tunnel IPv6 sur IPv4 en montrant le principe du tunnel configuré et celui du tunnel automatique. De nombreuses techniques à base de tunnels existent, comme le rappelle le [RFC 7059](#). Nous retiendrons la technique adaptée à une simple connectivité avec l'internet v6 et celle pour établir des tunnels automatiques à l'intérieur d'un site.

Principe du tunnel IPv6 sur IPv4

Le tunnel est un mécanisme bien connu dans le domaine des réseaux, qui consiste à faire qu'une unité de transfert d'un protocole (PDU *Protocol Data Unit*) d'une couche se trouve encapsulée dans la charge utile de l'unité de transfert (PDU) d'un autre protocole de la même couche. Ainsi, des protocoles « transportés » peuvent circuler dans un réseau construit sur un protocole encapsulant. Dans le cas d'IPv6, cette technique a été définie dans le [RFC 4213](#) et porte le nom de *6in4*. L'encapsulation du paquet IPv6 dans le paquet IPv4 s'effectue comme illustré par la figure 1. Le paquet IPv6 occupe le champ données du paquet IPv4. Le champ `protocol` de l'en-tête du paquet IPv4 prend la valeur 41 (en décimal) pour indiquer qu'il encapsule un paquet IPv6. Les extrémités du tunnel peuvent être des hôtes ou des routeurs. Les nœuds, aux extrémités du tunnel, sont appelés des tunneliers (*tunnel end point*) et peuvent être configurés manuellement ou avoir une configuration dynamique. Dans ce dernier cas, on parle aussi de tunnel automatique.

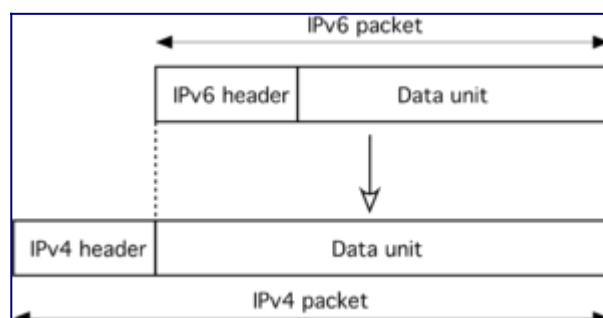


Figure 1 : Encapsulation pour un tunnel.

Le notion de tunnel équivaut à un câble virtuel bidirectionnel permettant d'assurer une liaison point à point entre deux nœuds IPv6 ou entre deux réseaux IPv6 et fournir ainsi une

connectivité comme l'illustre la figure 2.

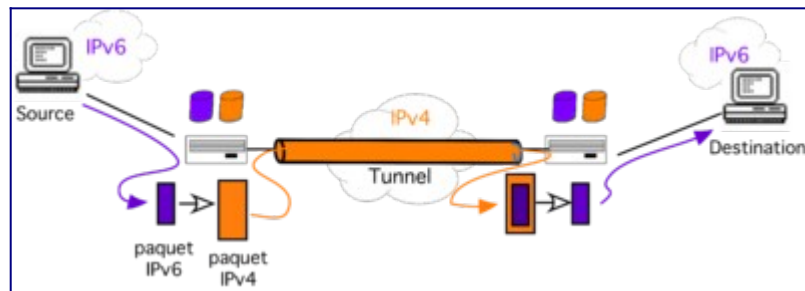


Figure 2 : Tunnel entre des réseaux IPv6.

Les tunneliers sont, dans cet exemple, des routeurs en double pile. L'architecture de protocoles peut se représenter par la figure 3. Cette figure montre la réception d'un paquet en IPv6 natif et son émission dans le tunnel. La réception d'un paquet IPv6 du tunnel et son émission en natif empruntent le même chemin, mais en sens opposés. Le routeur tunnelier est un nœud qui, comme tous les routeurs, possède au moins 2 interfaces, une sur le réseau IPv4 et une sur le réseau IPv6. Cela peut être deux interfaces physiques distinctes, ou deux interfaces virtuelles sur la même interface physique. Il convient à ce stade de rappeler que les systèmes de transmission comme Ethernet ou Wi-Fi sont multiprotocoles : ils sont capables de transmettre des trames contenant des paquets IPv4 comme IPv6.

La particularité d'un tunnelier est qu'il dispose en plus d'une interface logique interne, extrémité du tunnel sur laquelle s'opère l'encapsulation / décapsulation des paquets IPv6 dans le champ "données" des paquets IPv4. Cette interface dispose d'une adresse IPv4 et d'une adresse IPv6 (GUA, ULA, ou d'une adresse, à préfixe nul "*IPv4 compatible*" ou "*IPv4 mapped*" étant donné qu'il s'agit d'une interface logique interne au routeur). Cette adresse IP sera l'adresse de « prochain saut » pour les routes vers les préfixes IPv6 à atteindre à l'autre extrémité du tunnel. Cela peut également être la route par défaut s'il s'agit d'un tunnel reliant un îlot IPv6 à l'internet v6.

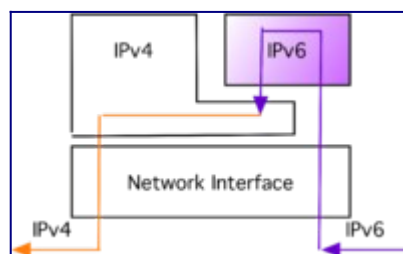


Figure 3 : Architecture d'un routeur tunnelier.

La différence avec un lien réel porte sur la taille de la MTU. En raison de l'encapsulation dans IPv4, un tunnel se caractérise par une MTU diminuée d'une vingtaine d'octets. Ainsi, la taille du paquet IPv6 se verra limitée par rapport à la MTU du lien réel. Par exemple, si la MTU du support est de 2000 octets. Le paquet IPv4 pourra avoir une taille maximale de 2000 octets. Si Le paquet IPv6 doit emprunter un tunnel sur ce réseau. Du fait d'un taille minimale de 20 octets pour l'en-tête IPv4, la MTU utilisable par le paquet IPv6 sera de 1980 octets comme l'illustre la

figure 1. Normalement, la fragmentation et la découverte de la MTU du chemin servent à adapter la taille des paquets IPv6 à la MTU du tunnel. En pratique, des routeurs mal configurés peuvent filtrer les messages ICMP, dont le type utilisé pour la découverte de la MTU (message ICMP *Packet Too Big*). Ceci a pour effet d'empêcher la détermination de la MTU, et donc rend la fragmentation IPv6 inopérante. Cela génère des erreurs de transmission, comme un client qui parvient à communiquer avec un serveur tant qu'il envoie des petits paquets mais qui ne reçoit rien quand il demande un fichier, c'est-à-dire quand les paquets de taille importante sont émis. Pour rappel, les paquets IPv6, lorsqu'ils ne peuvent être transmis par un routeur à cause de leur taille, sont supprimés par celui-ci. Conjointement à la destruction du paquet, le message ICMP *Packet Too Big* est envoyé à la source pour que celle-ci ajuste la taille du paquet.

Tunnel configuré

La configuration d'un tunnel consiste à créer une interface réseau représentant l'extrémité du tunnel, indiquer les adresses IPv4 des extrémités, allouer un préfixe IPv6 pour ce lien point-à-point virtuel, et spécifier les routes pour suivre ce tunnel. Dans le cas d'un tunnel configuré, les informations de la réalisation du tunnel sont indiquées par un administrateur.

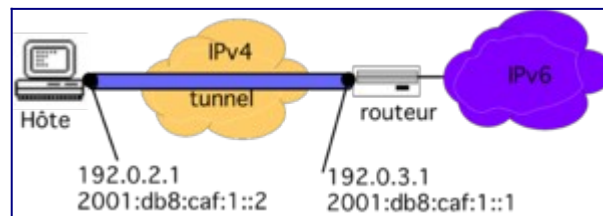


Figure 4 : Cas d'un tunnel configuré.

Pour illustrer la configuration d'un tunnel, la figure 4 montre le cas d'un tunnel reliant un hôte sous Linux avec un routeur. Dans cette situation, les commandes de configuration à appliquer pour l'hôte sont celles indiquées ci-dessous. La première commande crée l'interface du tunnel nommée `6in4` et y associe les adresses des extrémités du tunnel. Ces adresses sont l'adresse "source" et l'adresse "destination" du paquet IPv4, qui encapsulera le paquet IPv6. Ensuite l'interface du tunnel est activée. Enfin il ne reste plus qu'à configurer l'interface réseau du tunnel comme toutes les interfaces réseau d'un hôte à savoir :

- attribuer une adresse IPv6 et indiquer le préfixe réseau du lien (ici le tunnel),
- indiquer la route par défaut passant par le routeur local.

```
ip tunnel add 6in4 mode sit remote 192.0.3.1 local 192.0.2.1
ip link set dev 6in4 up

ip -6 addr add 2001:db8:caf:1::2/64 dev 6in4
ip -6 route add ::/0 via 2001:db8:caf:1::1 dev 6in4
```

Les performances d'un tunnel vont dépendre de sa longueur. Pour éviter d'avoir des délais trop importants, il convient de configurer un tunnel vers le point IPv6 le plus proche.

Connectivité d'un site isolé : *Tunnel Broker*

La croissance du réseau IPv6 a commencé en s'appuyant sur l'infrastructure de communication de IPv4. Les premiers tunnels étaient configurés manuellement et pouvaient être très longs (et donc peu performants). La longueur d'un tunnel s'apprécie par le nombre de sauts IPv4 ou la distance qui sépare les 2 extrémités du tunnel. Pour des personnes non qualifiées, ceci reste complexe tant du point de vue technique que du point de vue du choix du point de sortie du tunnel. La constitution d'un tunnel a été simplifiée par l'introduction du *Tunnel Broker* [RFC 3053]. Les *Tunnel Brokers* représentent une méthode pour connecter un réseau IPv6 à l'internet v6. L'idée du *Tunnel Broker* consiste à mettre en œuvre une interaction de type "client/serveur". La partie cliente est localisée côté utilisateur tandis que la partie serveur traite les demandes de tunnels. Le modèle du *Tunnel Broker* est représenté par la figure 5.

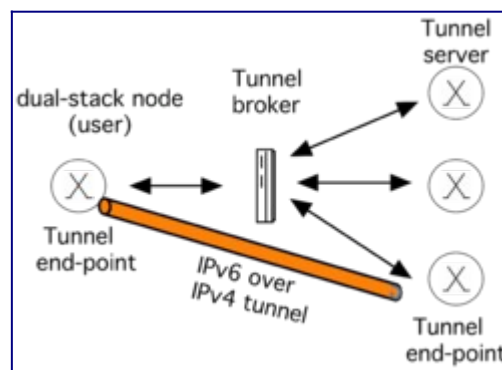


Figure 5 : Modèle du *Tunnel Broker*.

La création d'un tunnel à l'aide d'un *Tunnel Broker* fonctionne de la manière indiquée par la figure 6 ; à savoir :

1. Une machine "double pile" du réseau IPv6 (typiquement un routeur) négocie avec le *Tunnel Broker* afin de s'authentifier et d'obtenir les informations de configuration du tunnel ainsi qu'un préfixe délégué.
2. Le *Tunnel Broker* configure le serveur de tunnel retenu.
3. Le *Tunnel Broker* envoie le script de configuration à la machine "double pile" coté utilisateur.
4. Cette dernière, en exécutant le script reçu, crée le tunnel. Elle va ensuite encapsuler ses paquets IPv6 dans des paquets IPv4 à destination du serveur de tunnels, qui sert également de routeur. Ainsi, une communication en IPv6 peut s'effectuer entre des nœuds d'un réseau IPv6 isolé avec des nœuds de l'internet v6.

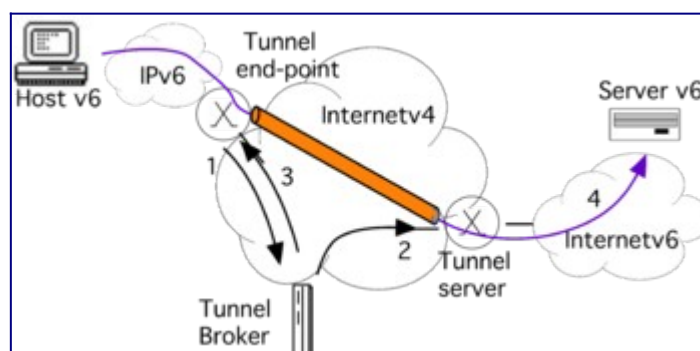


Figure 6 : Configuration d'un *Tunnel Broker* avec TSP.

La négociation est opérée à l'aide du protocole TSP (*Tunnel Set Up Protocol*) [RFC 5572]. En l'absence de TSP, la demande de connexion au *Tunnel Broker* est réalisée par une interface web dont l'URL est connue à l'avance. Par cette interface, les paramètres nécessaires à l'établissement du tunnel entre le nœud de l'utilisateur et le serveur de tunnels sont récupérés. Le protocole de négociation TSP automatise cet échange. Plus précisément, TSP traite les paramètres suivants :

- l'authentification de l'utilisateur ;
- le type de tunnel :
 - tunnel IPv6 sur IPv4 [RFC 4213],
 - tunnel IPv4 sur IPv6 [RFC 2473],
 - tunnel IPv6 sur UDP-IPv4 pour la traversée de NAT ;
- les adresses IPv4 pour les deux extrémités du tunnel ;
- l'adresse IPv6 assignée lorsque le client TSP est un terminal ;
- le préfixe IPv6 alloué lorsque le client TSP est un routeur.

TSP s'appuie sur l'échange de simples messages XML dont un exemple est donné ci-dessous. Cet exemple correspond à la demande de création d'un tunnel simple par un client TSP :

```
-- Successful TCP Connection --
C:VERSION=2.0.0 CR LF
S:CAPABILITY TUNNEL=V6V4 AUTH=ANONYMOUS CR LF
C:AUTENTICATE ANONYMOUS CR LF
S:200 Authentication successful CR LF
C:Content-length: 123 CR LF

1.1.1.1

CR LF
S: Content-length: 234 CR LF
200 OK CR LF

206.123.31.114

3ffe:b00:c18:ffff:0000:0000:0000:0000

1.1.1.1

3ffe:b00:c18:ffff::0000:0000:0000:0001

userid.domain

CR LF
C: Content-length: 35 CR LF
CR LF
```

La connectivité offerte par les *Tunnel Brokers* est en général fournie à titre provisoire (soit en

attendant que l'offre des FAI soit disponible, soit pour faire des tests de validation, par exemple). Elle peut aussi être une première étape pour un prestataire de services pour procurer de la connectivité IPv6 à ses usagers. Afin de promouvoir le passage à IPv6, les *Tunnel Brokers* sont souvent gratuits[2]. Lorsque le *Tunnel Broker* a une faible répartition géographique de ses serveurs de tunnels, pour certains utilisateurs, la longueur des tunnels reste un problème.

Tunnel automatique

Un tunnel configuré demande un travail de configuration pour chaque tunnel, ce qui peut être vu comme un inconvénient. Avec l'automatisation, l'intervention de l'administrateur est réduite à une phase de "configuration/initialisation" du service, à la place de celle de configuration des tunnels. Ainsi, des solutions d'automatisation ont été étudiées, qui ont comme principe de contenir l'adresse IPv4 du tunnelier de destination dans l'adresse IPv6 de destination. Ce principe d'embarquer l'adresse du tunnelier dans l'adresse IPv6 au niveau du préfixe est présenté par le [RFC 3056](#) et connu sous le nom de *6to4*. La figure 7 montre le cas d'application du tunnel automatique selon le principe *6to4*. Il s'agit de relier un réseau IPv6 qui n'a pas de lien en IPv6 à l'internet IPv6. La connectivité va être effectuée au moyen d'un tunnel automatique à l'aide d'un réseau IPv4 auquel le réseau IPv6 est relié via un routeur en double pile. Ce routeur se situe en bordure des réseaux IPv4 et IPv6. On appellera un tel routeur, tunnelier (*Tunnel end point*).

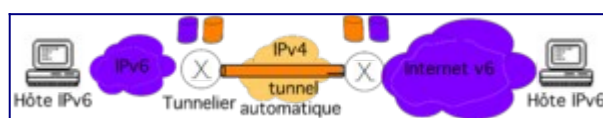


Figure 7 : Cas d'application d'un tunnel automatique.

Comme pour *6in4*, l'encapsulation des paquets IPv6 avec un tunnel automatique s'effectue dans les paquets IPv4. Par contre, au niveau de l'adressage, avec les tunnels automatiques, il faut définir un préfixe IPv6 spécifique qui indique qu'une adresse IPv4 est embarquée. La figure 8 illustre le mécanisme de construction d'un préfixe. Comme indiqué précédemment, le tunnelier se trouve en bordure du réseau. Il est connecté à la fois à l'internet v4 et à un réseau IPv6. C'est un nœud en double pile ; il possède obligatoirement une adresse IPv4 "unicast globale", comme 192.0.2.1 dans l'exemple. Retenons le préfixe spécifique **2002::/16**. Le préfixe du réseau IPv6 va être composé en concaténant le préfixe spécifique et l'adresse IPv4 "unicast globale" du tunnelier de ce réseau IPv6. Le préfixe du réseau IPv6 embarquant l'adresse IPv4 aura une longueur de 48 bits dans notre exemple et aura la valeur 2002:c000:201::/48 (0xc0 = 192). Il est à noter qu'il a la même longueur que la partie publique d'un préfixe IPv6 GUA.

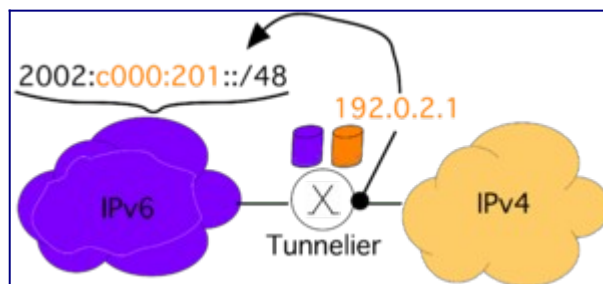


Figure 8 : Construction d'un préfixe IPv6 à partir de l'adresse IPv4 du tunnelier.

Aussi, comme le montre la figure 9, le préfixe de 48 bits laisse un champ SID de 16 bits pour numéroté des sous-réseaux ou liens dans le réseau IPv6. Il est alors possible d'attribuer des adresses aux différents nœuds du réseau IPv6. Ils auront en commun d'avoir l'adresse IPv4 de leur tunnelier dans la partie préfixe de leur adresse.

| 16 bits | 32 bits | 16 bits | 64 bits |
|---------|------------|-----------|--------------|
| 2002 | IPv4 addr. | Subnet ID | Interface ID |
| /16 | /48 | /64 | /128 |

Figure 9 : Format d'une adresse construite sur la base d'une connectivité par un tunnel.

La figure 10 présente l'envoi d'un paquet IPv6 de l'hôte A vers l'hôte B. Dans un premier temps, A interroge le DNS pour connaître l'adresse IPv6 de B. Dans notre exemple, la réponse est 2002:c000:201:1::8051. Dans un second temps, l'hôte A émet le paquet vers cette destination. Ce paquet IPv6, dont l'adresse de destination commence par le préfixe 2002::/16, est acheminé vers un tunnelier de l'internet v6. Lorsque le paquet est reçu par le tunnelier, ce dernier analyse l'adresse IPv6 de destination et trouve l'adresse IPv4 de l'autre extrémité du tunnel (192.0.2.1 dans l'exemple). Il effectue alors la transmission du paquet IPv6 en l'encapsulant dans un paquet IPv4. C'est cette encapsulation qui forme le tunnel. Le tunnelier du côté de B désencapsule le paquet IPv6 et le route normalement vers sa destination finale B en utilisant le routage interne.

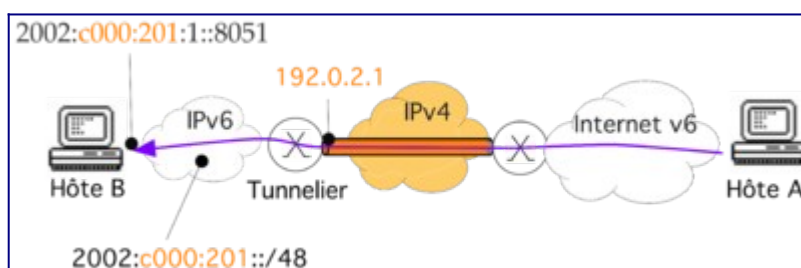


Figure 10 : Envoi d'un paquet IPv6 en passant par un tunnel automatique.

Le principe des tunnels automatique de type *6to4* est intéressant en théorie mais en pratique, il reste le problème des tunneliers du côté de l'internet v6. En effet, à qui incombe la responsabilité d'installer ces tunneliers ? Une réponse a été le fournisseur d'accès à Internet pour ses clients. C'est dans ce contexte que la technique *6rd* a été proposée et que nous allons voir dans la section suivante.

Connectivité sur une infrastructure IPv4 : 6rd

Le mécanisme *6rd* (*IPv6 Rapid Deployment*), proposé par le [RFC 5569](#) après son déploiement par Free, a été étendu pour devenir un standard par le [RFC 5969](#). *6rd* reprend le principe des tunnels automatiques du *6to4* en ciblant son application à un opérateur offrant une connectivité IPv6 et dont l'infrastructure repose sur IPv4. Cet opérateur peut être aussi bien public, comme un FAI, ou privé, comme une entreprise ou une administration.

L'idée de *6rd* porte sur l'utilisation d'un préfixe IPv6 propre à l'opérateur. Sa mise en oeuvre oblige l'opérateur à avoir le contrôle des 2 extrémités du tunnel. Autrement dit, il lui appartient d'installer un routeur de bordure connecté à l'internet v6. Il s'ensuit que les tunnels utilisés dans le contexte de *6rd* sont de longueur limitées à la taille du réseau IPv4 de l'opérateur. Il sont de fait court et ne sont pas sensés traverser l'internet. Les tunnels automatiques *6rd* ne servent qu'à passer la section IPv4 de l'opérateur. Avec *6rd*, on se retrouve dans le cas classique où les routeurs internes (dont les tunneliers) traitent le trafic produit et destiné aux hôtes connectés à l'opérateur. En fait, l'idée de *6rd* est de limiter la technique des tunnels automatiques pour un usage interne et local.

Dans la figure 11, qui schématise l'architecture de *6rd*, le routeur de bordure est noté, selon la terminologie du [RFC 5969](#), "*6rd BR*" (*Border Relays*). Ce routeur est un tunnelier connecté en IPv4 du côté de l'infrastructure de communication de l'opérateur et connecté en IPv6 du côté de l'internet v6. Le réseau local IPv6 du côté de l'abonné est connecté à l'infrastructure de communication de l'opérateur à l'aide d'un tunnelier. Ce dernier appelé "*6rd CE*" (*Customer Edge*), est également un routeur en "double pile". Concrètement, on le trouve sous la forme de la "box" dans l'installation des abonnés de l'opérateur. Chacun de ces tunneliers possède une adresse IPv4 sur l'interface réseau de l'infrastructure notée par exemple *a4* pour le réseau local A. De manière similaire au principe utilisé dans *6to4*, le préfixe IPv6 du réseau local est constitué en embarquant l'adresse IPv4 dans le préfixe IPv6 propre à cet opérateur noté *pref6rd*. Le préfixe IPv6 du réseau local est noté dans la figure 11 pour le réseau A *pref6rd:a4::*. La figure 12 montre que la connectivité en IPv6 peut être établie entre 2 hôtes par un tunnel entre 2 *box* ou entre une *box* et le routeur de bordure afin qu'un hôte puisse accéder à l'internet v6. Dans les deux cas, un tunnel automatique est établi pour passer l'infrastructure de communication centrale fonctionnant en IPv4.

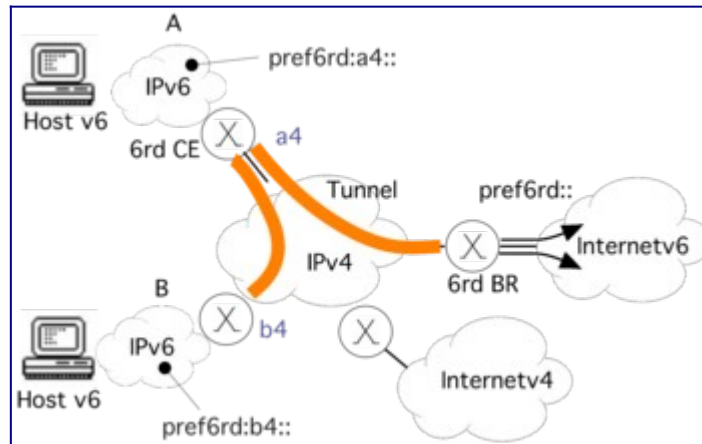


Figure 11 : Architecture de 6rd.

Le format de l'adresse IPv6 *6rd* dérive d'un préfixe $2000::/3$ pris dans le plan d'adressage global unicast (*GUA*). Il utilise le préfixe propre alloué au FAI par son registre régional (RIR). Il devient difficile de différencier un trafic sortant d'un réseau *6rd* d'un trafic IPv6 natif car les deux partagent le même préfixe. Le préfixe IPv6 du domaine de l'opérateur est complété par tout ou partie de l'adresse IPv4 alloué au *6rd CE*, pour former le préfixe *6rd*. Le "*6rd CE*" est l'extrémité du tunnel coté client (dans la figure 11) et connue comme la box fournie par le FAI. L'adresse IPv4 du routeur "*6rd CE*" est normalement publique, mais ce n'est pas obligatoire. L'organisation de l'adresse IPv6 est décrite par la figure 13. À noter que, au sein d'un même opérateur, si les adresses IPv4 s'agrègent sur un préfixe commun, il n'est pas nécessaire d'encoder la totalité des 32 bits de l'adresse IPv4 dans le préfixe IPv6 ; ce qui libère des bits pour laisser une numérotation des liens internes (SID) au réseau IPv6 à connecter. Il est laissé le soin à chaque opérateur de définir le nombre de bits de l'adresse IPv4 à conserver. La seule contrainte est que le préfixe réseau ne doit pas dépasser 64 bits autrement dit $n + i + s \text{ bits} = 64$ bits

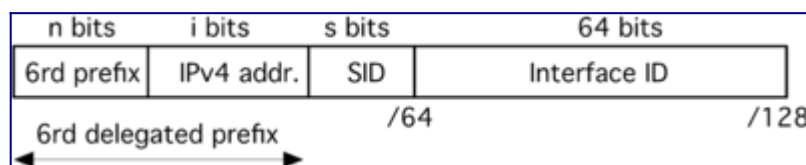


Figure 12 : Format d'une adresse 6rd.

Pour illustrer la figure 12, considérons tout d'abord que l'adresse IPv4 $192.0.2.129$ (c000:281 en hexadécimal) a été attribuée à l'interface du "*6rd CE*" du réseau local A de la figure 11. L'opérateur dispose du préfixe IPv6 $2001:db8::/32$ pour son domaine *6rd*. Les adresses de tous les "*6rd CE*" s'agrègent sur le préfixe $192.0.0.0/8$. L'opérateur peut garder 24 bits comme partie significative. Les 24 bits de poids faible de l'adresse IPv4 suffisent, en effet, à distinguer chacun des "*6rd CE*" de son réseau. Les 8 bits du préfixe IPv4 (valeur décimale 192 dans notre exemple) peuvent être omis. Le préfixe IPv6 de chaque "*6rd CE*" aura donc une longueur de 56 bits, correspondant à l'addition du préfixe du domaine (32 bits) avec la partie significative de l'adresse IPv4 (24 bits). Dans le cas de l'exemple, la figure 13 illustre cet assemblage entre le préfixe de l'opérateur et l'adresse IPv4. Pour plus de lisibilité, la partie significative de l'adresse IPv4 a été laissée en notation décimale pointée sur la figure. En

notation de l'adresse IPv6, le *6rd delegated prefix* pour le "6rd CE" d'adresse 192.0.2.129 sera 2001:db8:2:8100::/56. Il restera alors 8 bits, au titre du SID (*Subnet Identifier*), pour la numérotation des sous-réseaux internes du réseau connecté par le "6rd CE". À l'extérieur de l'opérateur, les adresses IPv6 apparaîtront comme des adresses IPv6 natives. À l'intérieur de l'opérateur, les adresses seront interprétées pour établir un tunnel entre les routeurs de bordures de l'infrastructure IPv4 de l'opérateur.

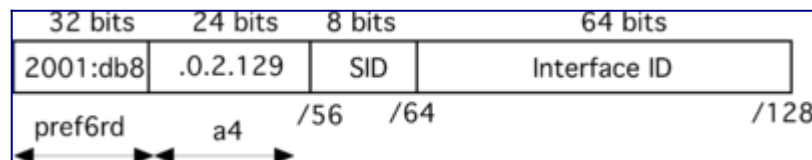


Figure 13 : Exemple de construction d'un préfixe délégué *6rd*.

Le transfert avec la technique *6rd* s'organise selon 3 cas :

- transfert inter-réseau IPv6 local. La figure 12 illustre ce cas lorsque les 2 hôtes souhaitent communiquer. La source de préfixe "pref6rd:a4" envoie un paquet IPv6 à destination de l'hôte de préfixe "pref6rd:b4". Le paquet IPv6 arrive en mode natif au "6rd CE" de la source. Si l'adresse IPv6 de destination est incluse dans le préfixe du domaine *6rd* configuré localement, il sera transmis directement à l'autre "6rd CE" comme c'est le cas ici. Les adresses IPv4 des "6rd CE" sont extraites des adresses IPv6 pour constituer le tunnel. Le paquet IPv4, d'adresse source "a4" et d'adresse destination "b4", encapsule le paquet IPv6. Ce paquet IPv4 est acheminé au "6rd CE" de destination par l'infrastructure IPv4 de l'opérateur. Le routeur "6rd CE" de destination reçoit le paquet IPv4. Il vérifie, par mesure de sécurité, que l'adresse source de l'en-tête IPv4 correspond à celle intégrée dans l'adresse IPv6 source. Il désencapsule le paquet IPv6 et le transmet sur le réseau local pour son acheminement à la destination IPv6 ;
- transfert du réseau local IPv6 vers l'internet v6. Le trafic IPv6 est reçu en mode natif sur le "6rd CE". L'adresse de destination IPv6 ne correspond pas à un préfixe IPv6 du domaine de l'opérateur, ce qui signifie que la destination est extérieure au domaine de *6rd* local. Dans ce cas, le paquet IPv6 doit être transmis à un routeur de bordure *6rd*. Comme dans le cas du transfert inter-site, le paquet IPv6 est encapsulé dans un paquet IPv4. Cependant, la différence est que l'adresse IPv4 du routeur de bordure est obtenue dans la table de routage du "6rd CE". Le routeur de bordure reçoit le paquet IPv4 et supprime l'encapsulation IPv4. Après le contrôle de sécurité, le paquet IPv6 est transmis sur l'internet v6 ;
- transfert de l'internet v6 vers le site. Si un routeur de bordure reçoit un paquet IPv6 à destination d'une adresse IPv4 incluse dans le préfixe *6rd* du domaine, il transmet le paquet au routeur "6rd CE" correspondant en utilisant le même principe que le cas précédent. Dans le cas du trafic retour, d'un flux initialisé par une machine *6rd*, comme l'adresse de destination est issue du préfixe global de l'opérateur, la voie retour passera par le même relais. Ainsi, la communication s'effectuera en empruntant la même route à

l'aller et au retour.

La technique *6rd* est adaptée à une mise en œuvre locale d'IPv6 pour un opérateur dont l'infrastructure interne fonctionne encore en IPv4[3]. Cette technique de tunnel répond à des questions de fiabilité et de délai. Comme le relais avec l'internet v6 est administré par, et pour, l'opérateur lui-même, le service de connectivité peut être de bonne qualité. En cas de défaillance, la responsabilité de l'opérateur est directement engagée.

Conclusion

Dans la démarche d'intégration d'IPv6, la meilleure solution est d'utiliser IPv6 nativement, comme IPv4. La complexité supplémentaire induite par les tunnels, ainsi que la réduction de la MTU qu'ils imposent (entraînant des problèmes de connectivité "épisodiques") sont épargnées. Mais il n'est pas toujours possible de maintenir la connectivité IPv6 ou de trouver un opérateur offrant la connectivité IPv6. Alors, dans ces situations, il faut se résoudre à utiliser des tunnels. Le [RFC 7059](#) effectue un inventaire des techniques d'intégration reposant sur des tunnels. Toutes les techniques ne se valent pas du point de vue des performances et de la fiabilité. Les meilleures techniques sont celles qui établissent des tunnels locaux ou de courte distance et pour lesquelles les extrémités du tunnel sont gérées et offrent un service contractuel. Le choix d'une technique de tunnel doit se faire en fonction des besoins de connectivité du réseau dans lequel IPv6 doit être intégré.

Nous avons présenté, dans cette activité, les techniques les plus intéressantes pour établir une connectivité IPv6. Le *tunnel broker* représente une méthode pour tirer un simple tunnel entre un réseau IPv6 isolé et un point d'entrée de l'internet v6. Les techniques *6to4* et *6rd* utilisent des tunnels automatiques au sein du réseau IPv4 d'une organisation. Si le principe de tunnel automatique de *6to4* est pertinent, sa mise en œuvre a été problématique. La dépréciation récente du préfixe anycast réservé à son usage entraîne, de fait, son déclin. La variante *6rd*, en corrigeant les défauts de *6to4*, se positionne comme une alternative.

6rd repose sur l'encapsulation directe : le paquet IPv6 est placé directement dans un paquet IPv4. Ce mode d'encapsulation ne traverse pas les NAT car les NAT ont, pour la plupart, la capacité de traiter uniquement les protocoles de transport TCP et UDP. La technique de tunnel Teredo [\[RFC 4380\]](#) traite ce problème en encapsulant les paquets IPv6 dans UDP puis dans IPv4. Il a été reporté par l'article[4] des performances et une fiabilité du service de connectivité de très mauvaise qualité. Cette solution comme *6to4* ont négligé la mise en œuvre opérationnelle et ne sont plus utilisées de nos jours.

Pour conclure, nous rappelons la règle habituelle de connectivité d'IPv6 qui dit : « double-pile où tu peux, tunnel où tu dois » (*Dual stack where you can; tunnel where you must*). La double-pile (IPv4 et IPv6 sur tous les équipements) est la solution la plus simple pour la gestion du réseau. Le tunnel est plus fragile et fait dépendre IPv6 d'IPv4. Il sert dans les situations où des routeurs antédiluviens ne peuvent être mis à jour pour traiter des paquets IPv6. Le tunnel est solution d'attente avant le remplacement par un équipement moderne.

Références bibliographiques

1. ↑ Cui Y., Dong J., Wu P., et al. (2012) IEEE Internet Computing. April. Tunnel-based IPv6 Transition.
2. ↑ Linux Review. [Free IPv4 to IPv6 Tunnel Brokers](#)
3. ↑ Cisco. (2011). White paper. [IPv6 Rapid Deployment: Provide IPv6 Access to Customers over an IPv4-Only Network](#)
4. ↑ Huston, G. (2011). The ISP Column. [Testing Teredo](#)

Pour aller plus loin

RFC et leur analyse par S. Bortzmeyer :

- [RFC 2473](#) Generic Packet Tunneling in IPv6 Specification
- [RFC 3053](#) IPv6 Tunnel Broker
- [RFC 3056](#) Connection of IPv6 Domains via IPv4 Clouds
- [RFC 4213](#) Basic IPv6 Transition Mechanisms [Analyse](#)
- [RFC 4380](#) Teredo: Tunneling IPv6 over UDP through Network Address Translations (NATs)
- [RFC 5569](#) IPv6 Rapid Deployment on IPv4 Infrastructures (6rd) [Analyse](#)
- [RFC 5572](#) IPv6 Tunnel Broker with the Tunnel Setup Protocol (TSP) [Analyse](#)
- [RFC 5969](#) IPv6 Rapid Deployment on IPv4 Infrastructures (6rd) [Analyse](#)
- [RFC 6180](#) Guidelines for Using IPv6 Transition Mechanisms during IPv6 Deployment [Analyse](#)
- [RFC 6343](#) Advisory Guidelines for 6to4 Deployment
- [RFC 6782](#) Wireline Incremental IPv6 [Analyse](#)
- [RFC 7059](#) A Comparison of IPv6 over IPv4 Tunnel Mechanisms [Analyse](#)
- [RFC 7381](#) Enterprise IPv6 Deployment Guidelines [Analyse](#)
- [RFC 7526](#) Deprecating Anycast Prefix for 6to4 Relay Routers [Analyse](#)

Activité 43 : Interopérer les applications par traduction

Contexte d'utilisation de la traduction

Le besoin de traduction d'un protocole vers un autre apparaît si l'on souhaite faire communiquer deux machines ne parlant chacune qu'un seul de ces deux protocoles, le traducteur jouant alors un rôle d'intermédiaire (ou relais) dans la communication. Ce besoin de traduction est la conséquence de l'échec du plan de migration envisagé au début et reposant sur la double pile. Les nouveaux nœuds ne peuvent plus avoir à la fois une adresse IPv4 et une adresse IPv6, du fait de l'épuisement des adresses IPv4. Cet état de fait conduit à l'apparition de nœuds avec IPv6 uniquement. Comme il y a des nœuds qui sont toujours en IPv4 uniquement car ils n'ont pas commencé à migrer, se pose le problème de la communication entre les nœuds uniquement IPv6 avec ceux uniquement IPv4. La traduction est la solution à ce problème et constitue le composant essentiel du nouveau plan de migration, qui peut se décrire de manière synthétique suivante : "tout le monde en IPv4" -> "certains réseaux en IPv4 seul et certains en IPv6 seul" -> "tout le monde en IPv6".

Afin de respecter les modèles d'architectures en couches (OSI, TCP/IP), la traduction n'intervient qu'entre protocoles d'un même niveau. On pourra donc distinguer la traduction de niveau applicatif, de niveau transport, et de niveau réseau. Dans le cas du protocole IP (niveau réseau), il s'agit bien sûr de faire communiquer deux machines, chacune n'utilisant qu'une version du protocole, IPv4 ou IPv6. Dans le cadre d'une communication "client vers serveur", il y aura donc 2 cas :

1. Le client ne parle qu'IPv6 et le serveur ne parle qu'IPv4 ;
2. Le client ne parle qu'IPv4 et le serveur ne parle qu'IPv6.

Aujourd'hui, le cas le plus fréquent est le premier ; les serveurs gardant majoritairement une connectivité IPv4. Il s'agit donc de mettre en place un dispositif pour offrir une connectivité IPv4 aux clients IPv6. Ainsi, ils pourront accéder à des serveurs qui n'ont toujours pas IPv6. Un moyen, pour offrir cette connectivité, est de traduire automatiquement les paquets IPv6 du client en IPv4 pour les envoyer au serveur, et de faire la traduction inverse au retour. Un tel dispositif devra naturellement se situer en coupure des communications entre le client et le serveur, afin d'en intercepter les paquets pour les traduire, et les réémettre sur le réseau du destinataire. Ce dispositif est comparable au traditionnel NAT (*Network Address Translator*) utilisé entre les réseaux IPv4 privés et publics. Mais, dans notre cas, ce dispositif n'effectue pas une simple **translation** d'un espace d'adressage à un autre, mais une véritable **traduction** de l'en-tête IP. Le traducteur assurant le relais entre un réseau IPv6 (coté client) et un réseau IPv4 (coté serveur) est appelé NAT64. La figure 1 représente la topologie d'utilisation du NAT64. Les spécifications pour cette traduction ont été publiées par le groupe de travail Behave^[1] de l'IETF qui avait déjà publié des travaux pour le NAT44.

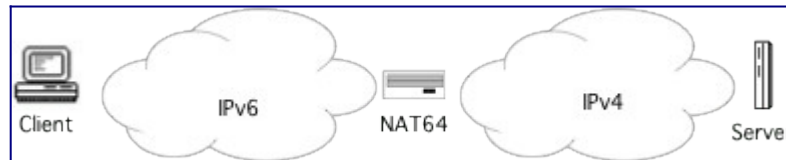


Figure 1 : Topologie d'utilisation du NAT64.

Le [RFC 6144](#) détaille les cas d'utilisation de la traduction entre IPv6 et IPv4 en distinguant l'internet et un réseau. Ainsi, un réseau dont le plan d'adressage est administrable est distingué de celui qui ne l'est pas. Le RFC indique notamment que le cas du client IPv4 accédant à un serveur de l'internet IPv6 n'est pas d'actualité et d'autres solutions que la traduction IP de type NAT46 seront à envisager. Les cas d'utilisation communs de la traduction sont : soit un client d'un réseau IPv6 accédant à un serveur de l'internet v4, soit des clients de l'internet v6 accédant à un serveur d'un réseau IPv4. Dans le premier cas, le traducteur est du côté du client IPv6 pour le rendre capable d'accéder à des contenus disponibles uniquement sur l'internet IPv4. Dans le [RFC 7269](#), ce type de NAT64 est appelé NAT64-CGN (*Carrier-Grade NAT*). Dans le second cas, le traducteur est du côté du serveur IPv4 pour rendre le service accessible aux clients de l'internet IPv6. Le [RFC 7269](#) qualifie ce NAT64 de NAT64-FE (*Front End*) dans la mesure où le NAT64 est devant les serveurs au sein d'un *data center*. Quelque soit le cas, la traduction reste une solution temporaire et vise à faciliter le déploiement d'IPv6 dans l'internet v4.

Un contexte, pour lequel ce type de solution est pertinent, est celui des réseaux mobiles 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) [\[2\]](#). En effet, dans la norme 3GPP, les sessions PDP (*Packet Data Protocol*) mises en place pour la transmission de données ne peuvent être "double pile" que depuis la *Release-9*. Pour avoir un support "double pile" sur ces réseaux, il est nécessaire d'ouvrir deux contextes, ce qui peut être préjudiciable pour le dimensionnement des équipements. Une solution est alors de ne déployer qu'une version du protocole sur le réseau mobile. Les équipements mobiles seront donc connectés à un réseau IPv6 et la compatibilité avec les services IPv4 sera assurée par la traduction d'en-tête IP.

Principe de la traduction entre protocoles IP

La traduction entre protocoles IP comporte essentiellement deux composants[\[3\]](#) : une transposition protocolaire et une traduction des adresses. Le premier composant transpose les champs de l'en-tête IP (à l'exception des adresses) en conservant la sémantique du champ original. Le second composant met en correspondance les adresses "source" et "destination" du paquet reçu dans une version du protocole IP, dans leur équivalent dans l'autre version du protocole IP.

Les traductions peuvent être faites "sans état" (*stateless*) [RFC 7915](#) ou bien "avec état" (*stateful*) [RFC 6146](#). Dans le premier cas, le traducteur n'a aucune mémoire. Chaque paquet est traité isolément et contient toutes les informations nécessaires à la traduction. Avec la traduction "sans état", les meilleures performances sont obtenues pour la quantité de paquets

traités et le passage à l'échelle. Dans le second cas, celui de la traduction "avec état", le traducteur se souvient de la correspondance qu'il a effectué entre les deux versions du protocole, par exemple parce que l'adresse IPv6 n'est pas en correspondance univoque (1:1) avec l'adresse IPv4. Nécessitant une table des correspondances en mémoire, la traduction "avec état" passe moins bien à l'échelle. Mais, dans certains cas, elle est la seule réaliste, puisqu'on ne peut pas stocker toutes les informations dans une seule adresse, surtout si elle est IPv4. Si le composant de la transposition des champs de l'en-tête s'effectue "sans état", le composant de traduction des adresses fonctionne "avec" ou "sans état".

Transposition protocolaire des champs de l'en-tête ([RFC 7915](#))

Il faut ici bien situer le problème : le traducteur qui reçoit un paquet avec un en-tête IPvX doit créer un nouvelle en-tête IPvY à partir des informations à sa disposition : les données de l'en-tête IPvX et des données de configuration.

Si l'on observe les en-têtes IPv4 et IPv6, on remarque qu'il y a un certain nombre de champs qui ont une sémantique très proche (*TTL/Hop limit*, *DiffServ*, *Payload Length*). Pour ces derniers, la transposition est évidente. Les tableaux 1 et 2 résument les informations qu'il faut utiliser pour renseigner les différents champs des en-têtes IPv4 ou IPv6 que doit créer le traducteur (Voir [RFC 7915](#) section 4)

| Champ de l'en-tête IPv4 | Champ dans le nouvel en-tête IPv6 | Valeur |
|---------------------------|-----------------------------------|---|
| Version | Version | 6 |
| IHL | | Ignorer |
| Type Of Service | Traffic Class | Recopier |
| | Flow label | 0 |
| Packet Length | Payload Length | Packet Length - IHL (en-tête IPv4 + options) + 8 (si extension de fragmentation) |
| Ident./Flag/Offset | Extension Fragmentation | Créer une extension de fragmentation à partir des valeurs IPv4 |
| TTL | Hop Limit | Décrémenter de 1 |
| Protocol | Next Header | Recopier ou extension de fragmentation si besoin. ICMPv4 (1) devient ICMPv6 (58). |
| Checksum | | Ignorer |
| Source Address | Source Address | Voir le paragraphe <i>Traduction des adresses</i> |

| | | |
|----------------------------|---------------------|---|
| Destination Address | Destination Address | Voir le paragraphe <i>Traduction des adresses</i> |
| Options IPv4 | | Les options IPv4 ne sont pas traduites. |

Tableau 1 : Création d'un en-tête IPv6 à partir d'un en-tête IPv4

| Champ de l'en-tête IPv6 | Champ dans le nouvel en-tête IPv4 | Valeur |
|----------------------------|-----------------------------------|--|
| Version | Version | 4 |
| | IHL | 5 |
| Traffic Class | Type of Service | Recopier |
| IPv6 Flowlabel | | Ignorer |
| Payload Length | Packet Length | Payload Length + IHL |
| | Ident./Flag/Offset | 0 |
| Hop Limit | TTL | Décrémenter de 1 |
| Next Header | Protocol | Recopier. ICMPv6 (58) devient ICMPv4 (1) |
| | Checksum | Calculer une fois l'en-tête créé |
| Source Address | Source Address | Voir le paragraphe <i>Traduction des adresses</i> |
| Destination Address | Destination Address | Voir le paragraphe <i>Traduction des adresses</i> |
| Extensions IPv6 | | Les extensions d'en-tête IPv6 ne sont pas traduites. |

Tableau 2 : Création d'un en-tête IPv4 à partir d'un en-tête IPv6

Les adresses pour les traducteurs d'adresse NAT64 ([RFC 6052](#))

Le [RFC 6052](#) décrit les différents formats d'adresse mis en œuvre par les traducteurs NAT64 "avec" ou "sans état". Ce RFC définit un préfixe réservé (*well-known prefix*) **64:ff9b::/96** ainsi que les règles pour embarquer une adresse IPv4 dans des préfixes IPv6 de 32, 40, 48, 56, 64 ou 96 bits. Ce préfixe a été choisi car il est neutre vis-à-vis du calcul du *checksum* effectué avec le pseudo-entête.

Lorsque l'adresse IPv4 occupe la partie basse de l'adresse IPv6, les 32 bits de poids faible (bits 96 à 127), la notation décimale pointée traditionnelle d'IPv4 est tolérée. Ainsi, l'adresse `2001:db8:900d:cafe::c0a8:a05` peut être notée `2001:db8:900d:cafe::192.168.10.5` lors d'une saisie (configuration manuelle d'interface ou passage de paramètre en ligne de commande...). Cependant, elle sera affichée sous sa forme canonique ([RFC 5952](#)) `2001:db8:900d:cafe::c0a8:a05` dans le journal de bord (*log system*) de la machine. Dans ce cas, si la saisie peut nous sembler familière, la correspondance entre l'adresse IPv6 et l'adresse IPv4 embarquée est moins évidente à l'affichage.

[illegible]

Les 8 bits aux positions 64 à 71 sont réservés et doivent être nuls. Cela entraîne que, pour les préfixes de longueur 40, 48 et 56, l'adresse IPv4 est scindée en deux parties.

La traduction d'adresses d'un protocole à un autre suit le même principe que celui appliqué dans les passerelles NAT traduisant des adresses IPv4 privées vers des adresses IPv4 publiques (appelé aussi NAT44). Le traducteur reçoit un paquet avec des adresses "source" et "destination" chacune dans un des espaces d'adressage, et doit traduire ces adresses dans l'autre espace d'adressage pour pouvoir réémettre le paquet. Le traducteur doit donc mettre en correspondance une adresse de l'espace d'adressage IPv6 avec une adresse de l'espace d'adressage IPv4 et *vice-versa* à la fois pour l'adresse "source" et l'adresse "destination". Afin de faire cette correspondance, le NAT64 dispose d'un ensemble d'adresses IPv6 et d'un ensemble d'adresses IPv4, comme le montre la figure 2. L'ensemble d'adresses IPv6 du NAT64 (notées N6) va servir à représenter les adresses IPv4 (notées H4) dans le réseau IPv6. Et, de manière similaire, l'ensemble des adresses IPv4 du NAT64 (notées N4) va servir à représenter les adresses IPv6 (notées H6) dans le réseau IPv4.

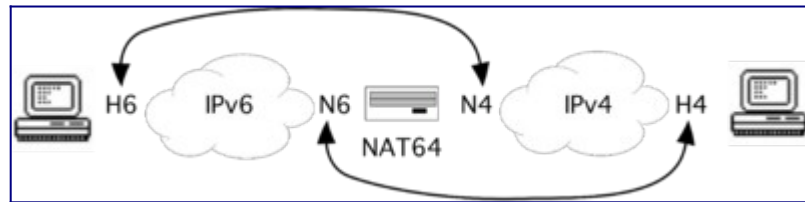


Figure 2 : Les adresses utilisées pour la traduction.

La correspondance entre une adresse IPv4 et une adresse IPv6 est évidente lorsque l'adresse IPv6 comporte l'adresse IPv4. En effet, représenter une adresse IPv4 dans l'espace d'adressage IPv6 est simple car ce dernier est assez large pour contenir l'ensemble des adresses IPv4. Il est donc toujours possible de trouver une adresse IPv6 à faire correspondre à une adresse IPv4. Le [RFC 6052](#) décrit la méthode pour créer une adresse IPv6 à partir d'une adresse IPv4. La méthode consiste à inclure les 32 bits de l'adresse IPv4 à la suite d'un préfixe IPv6. Selon la longueur du préfixe IPv6, le mécanisme d'inclusion de l'adresse IPv4 est différent, comme précisé dans le [RFC 6052](#) Section 2.2. Une adresse IPv6 embarquant une adresse IPv4 (*IPv4-embedded IPv6 address*) est qualifiée, soit de **traduisible en IPv4** (*IPv4-translatable IPv6 address*) si elle est unique globalement, routable et donc attribuée à un nœud IPv6, soit de **convertible en IPv4** (*IPv4-converted IPv6 address*) si elle ne fait que représenter un nœud IPv4 dans l'espace d'adressage IPv6. Dans ce dernier cas, l'adresse ne peut être pas attribuée à un nœud IPv6.

Selon le cas d'utilisation du NAT64, le préfixe d'une adresse IPv6 embarquant une adresse IPv4 (notée *pref64* dans la représentation ci-dessous) peut être le préfixe dit *Well-Known Prefix* (WKP) ou un préfixe pris dans le plan d'adressage de l'organisation déployant le NAT64 dit *Network-Specific Prefix* (NSP). Le WKP se définit par `64:ff9b::/96` et sert uniquement à constituer des adresses IPv6 convertibles en IPv4. Ce préfixe n'est pas routable sur l'internet v6. Il doit être utilisé uniquement en routage interne à un réseau.

La traduction d'adresses utilisant une adresse IPv6 embarquant une adresse IPv4 est qualifiée de **sans état**. Ainsi, les adresses sont auto-descriptives et peuvent être traduites indépendamment d'un paquet à un autre dans un même flux. La traduction peut se représenter de la manière suivante :

| | | |
|-----------|---------|------|
| IPv6 | <-----> | IPv4 |
| pref64:H4 | | H4 |

où *pref64* représente un préfixe IPv6 pour constituer une adresse IPv6 embarquant une adresse IPv4 (notée ici H4). L'adresse IPv6 ainsi constituée est notée *pref64:H4*. Cette dernière adresse est notée N6 dans le contexte de la figure 2 où H4 représente l'adresse du serveur. Il y a une correspondance de 1:1 entre l'adresse IPv6 et l'adresse IPv4. Le préfixe IPv6 utilisé sera un préfixe routé vers le traducteur, afin que celui-ci assure son rôle de relais.

Lorsque l'adresse IPv6 n'embarque pas l'adresse IPv4 et que l'adresse IPv4 ne peut contenir une adresse IPv6, alors mettre en correspondance une adresse IPv6 avec une adresse IPv4 demande une traduction d'adresse **avec état**. La mise en correspondance est faite dynamiquement par le traducteur. Celui-ci utilise une adresse IPv4 libre, sélectionnée dans un

ensemble (*pool*) d'adresses délégué au traducteur. Comme il peut ne pas y avoir assez d'adresses IPv4 pour les nœuds IPv6 (l'ensemble d'adresses IPv4 délégué au traducteur peut être moins fourni que le nombre de nœuds IPv6 pour lequel il assure la traduction), le traducteur peut être amené à utiliser le numéro de port de la couche de transport pour reconnaître les nœuds IPv6. La combinaison d'une adresse IP et d'un port est appelée adresse de transport. Le traducteur doit alors retenir cette association d'adresses (ou d'adresse de transport) entre IPv4 et IPv6 dans un état. Par exemple, dans le cas d'un traducteur entre un client IPv6 du réseau local et un serveur de l'internet v4, le traducteur ne sait pas comment traduire l'adresse source du paquet IPv6 : il doit utiliser une de ses propres adresses IPv4 pour définir une adresse de transport en IPv4. Le paquet "retour" contient alors cette adresse de transport comme destination. Le traducteur a bien besoin ici d'un état : la correspondance choisie pour le paquet "aller" entre l'adresse de transport "source" IPv6 et l'adresse de transport "source" IPv4. La traduction est alors dite "à état" car elle fait intervenir cette information. La traduction peut se représenter de la manière suivante, avec H6 qui représente l'adresse IPv6, et N4, l'adresse IPv4 :

| | | |
|------|---------------|------|
| IPv6 | -----> | IPv4 |
| H6 | (état H6->N4) | N4 |
| IPv6 | <----- | IPv4 |
| H6 | (état H6<-N4) | N4 |

La traduction **avec état** est similaire à celle que l'on trouve avec le NAT44. L'adresse de transport constituée par une adresse IPv6 et le numéro de port est convertie en une autre adresse de transport dans le réseau IPv4. On retiendra que dans ce mode de traduction, plusieurs nœuds IPv6 peuvent partager une adresse IPv4. Il y a alors une correspondance de N:1 entre l'adresse IPv6 et IPv4.

Mécanismes complémentaires

Traduction des paquets ICMP

Comme décrit dans l'activité 31, les messages ICMP servent au contrôle de la connectivité de bout en bout, ainsi qu'aux rapports d'erreurs d'acheminement des paquets. La présence d'un traducteur sur ce chemin ne doit pas perturber ce mécanisme, sous peine de grandement complexifier son fonctionnement. Celui-ci doit donc s'efforcer de traduire les messages ICMPv4 en messages ICMPv6, et inversement, pour être ainsi transparent dans ces échanges.

Le traducteur recevant un message ICMPv4 (resp. ICMPv6) doit donc interpréter le contenu de ce message pour créer un message ICMPv6 (resp. ICMPv4) à retransmettre. L'en-tête IP est traduit selon les mécanismes présentés plus haut. L'en-tête ICMPv4 (resp. ICMPv6) doit donc être transformé par le traducteur en en-tête ICMPv6 (resp. ICMPv4). Cette traduction est facilitée par le fait que les sémantiques des messages de ces deux protocoles ne sont pas très éloignées : les fonctions supplémentaires de découverte de voisins intégrées dans ICMPv6 ne sont valides que sur le lien et ne seront pas traduites. De plus, les paquets ICMP n'ont pas besoin d'informations contextuelles pour être interprétés. La traduction des messages ICMP est

dite **sans état**. Le [RFC 7915](#) définit le mécanisme pour effectuer cette traduction.

Le champ ICMP type devra être ajusté dans certains cas lors de la traduction car les valeurs pour la même sémantique de messages peuvent être différentes entre les deux versions du protocole. Par exemple, les messages *Echo Request* et *Reply* sont identifiés par la valeur du champ ICMP type : 8 et 0 en ICMPv4, 128 et 129 en ICMPv6. Certains messages ICMPv4 ne seront pas traduits car leur sémantique (obsolète) n'a pas été transposée dans ICMPv6.

La traduction de l'en-tête ICMP modifie les en-têtes des niveaux réseau et transport. Elle impacte donc la somme de contrôle calculée pour ces en-têtes. Le champ checksum doit donc être recalculé suite à la traduction.

Relais-traducteur DNS auxiliaire ([RFC 6147](#))

Auto-découverte des préfixes de traduction

Un équipement IPv6 peut synthétiser lui-même les adresses IPv4 en adresses IPv6 en préfixant les adresses IPv4 par le préfixe de traduction dédié (WKP) ou par un préfixe de traduction spécifique (NSP). Le préfixe est découvert de manière automatique selon une des deux méthodes suivantes :

- déduction heuristique selon l'algorithme décrit dans le [RFC 7050](#) (*Discovery of the IPv6 Prefix Used for IPv6 Address Synthesis*), complété par le [RFC 8880](#) (*Special Use Domain Name 'ipv4only.arpa'*) qui en précise les spécificités d'usage. En interrogeant le domaine réservé spécial **ipv4only.arpa**, sur lequel deux adresses IPv4 réservées 192.0.0.170 et 192.0.0.171 ont été enregistrées, un équipement pourra déduire le préfixe utilisé par l'éventuel résolveur DNS64 présent sur le réseau ;
- déduite des annonces de routeurs RA (*Router Advertisement*) si celles contiennent l'option PREF64 définies dans le [RFC 8781](#) (*Discovering PREF64 in Router Advertisements*).

Nota : Au moment de la rédaction de ce document, il ne semble pas que l'option PREF64 des RA soit souvent mise en œuvre, que ce soit dans les émetteurs ou dans les récepteurs, [par contre Wireshark sait déjà le décoder](#).

L'auto-découverte du préfixe de traduction est motivée par l'absence de DNS64 ou par le choix de l'administrateur de l'équipement de contrôler la résolution DNS, ou bien d'utiliser un autre résolveur qui ne fabrique pas les adresses IPv6 car :

- il veut faire la validation DNSSEC ;
- ou il veut se servir d'un résolveur extérieur, accessible via DoT ([RFC 7858](#) Specification for DNS over Transport Layer Security) ou DoH ([RFC 8484](#) DNS Queries over HTTPS) ;
- il ne fournit tout simplement pas de résolveur DNS64 ;
- il veut pouvoir utiliser des adresses IPv4 littérales, par exemple parce qu'on lui a passé l'URL <http://192.0.2.13/>, dans lequel il n'y a pas de nom à résoudre ;
- il utilise 464XLAT ([RFC 6877](#)) pour lequel la connaissance du préfixe IPv6 est nécessaire ;

Les clients IPv6 ne pouvant pas initier une communication avec des serveurs n'ayant qu'une adresse IPv4, il est nécessaire de les « leurrer » en fabriquant dynamiquement des adresses IPv6. Cette fabrication d'une adresse IPv6 pour le serveur IPv4 revient au relais DNS auxiliaire (*DNS Application Layer Gateway* : DNS-ALG). Celui-ci convertit, à la volée, l'adresse IPv4 obtenue par la résolution d'adresse en une adresse IPv6 imbriquant une adresse IPv4. En quelque sorte, le relais DNS auxiliaire ment en répondant au client par un enregistrement de type AAAA (adresse IPv6) à partir de l'enregistrement réel A (adresse IPv4) du serveur. L'adresse IPv6 ainsi "forgée" à partir de l'adresse IPv4 du serveur est qualifiée *IPv4-converted*. Du point de vue du client, le relais DNS auxiliaire se comporte comme n'importe quel serveur DNS récursif de rattachement. Il accepte les requêtes et les transfère au serveur DNS de rattachement, s'il ne dispose pas déjà de l'information dans son cache local. Mais ce DNS ment car il est capable de répondre positivement à la demande d'une ressource inexistante. Un relais DNS effectuant la résolution en IPv6 de nom de domaine enregistré uniquement en IPv4 est appelé **DNS64**.

La figure 3 montre un chronogramme des opérations de résolution d'adresse avec un DNS64. Le préfixe IPv6 utilisé dans cet exemple pour construire une adresse IPv6 "IPv4-convertible" est le WKP (*Well Known Prefix*) de longueur 96 bits (64 : ff9b : : /96). Toutefois, celui-ci ne doit pas être utilisé pour traduire des adresses privées définies par le [RFC 1918](#). On peut également, alors, employer un préfixe spécifique NSP (*Network Spécifique Préfixe*) non utilisé et réservé à cet usage du plan d'adressage du site en respectant le format du [RFC 6052](#). L'usage d'un préfixe spécifique de type NSP fonctionne selon le même principe.

Les opérations sont les suivantes :

1. Lorsqu'un client IPv6 formule une requête de type AAAA pour résoudre le nom d'un serveur, le DNS64 la transfère au serveur DNS en charge du nom de domaine du serveur.
2. Si la réponse est vide, le DNS64 renvoie une requête de type A pour le même nom de serveur au serveur DNS.
3. Le DNS64 reçoit une réponse à sa requête de type A.
4. Le DNS64 applique alors la traduction de l'adresse IPv4 obtenue en adresse IPv6, comme spécifié dans le [RFC 6052](#). Il combine le préfixe IPv6 aux 32 bits de chacune des adresses obtenues comme résultats. L'adresse IPv6 obtenue sera transmise au client en réponse à sa requête AAAA.

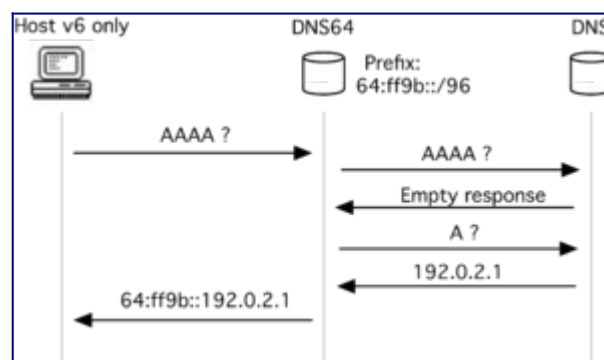


Figure 3 : Opérations du DNS64.

Les versions récentes du logiciel serveur DNS BIND/Named peuvent assurer le rôle de DNS64. Le logiciel *Trick or Treat Daemon* (TOTD) peut également être utilisé pour cet usage.

Mécanisme de transition NAT64/DNS64

NAT64 et DNS64 constituent ensemble une technique de traduction de niveau réseau. Le fonctionnement du NAT64 fonctionne **sans état** ou **avec état** en fonction du mode de traduction de l'adresse "source" et de l'adresse "destination" du paquet reçu par le traducteur[4].

NAT64 : traduction "sans état" [RFC 7915](#)

Le NAT64 "sans état" signifie que les adresses IPv6 du paquet sont traduites **chacune** "sans état", à l'aide de l'algorithme de correspondance défini dans le [RFC 6052](#). Comme indiqué précédemment, le point essentiel dans ce mode de traduction est que l'adresse IPv4 est comprise dans l'adresse IPv6. Aussi, un préfixe IPv6 spécifique est dédié pour représenter les nœuds IPv4 dans le monde IPv6. Pour appliquer ce mode de traduction, le nœud IPv6 est identifié dans l'adressage IPv4 par une adresse IPv4. Et inversement, un nœud IPv4 est identifié par une adresse IPv6 dans l'espace d'adressage IPv6. Ainsi, quel que soit le sens de la traduction, la correspondance d'adresse est unique : d'un côté il faut l'extraire de l'adresse IPv6, de l'autre côté il faut combiner l'adresse IPv4 avec le préfixe pour former une adresse IPv6. C'est grâce à cette correspondance directe qu'il n'est pas nécessaire de maintenir un état pour la traduction entre IPv6 et IPv4. Cependant, cela requiert que les nœuds IPv6 devant communiquer avec le monde IPv4 soient configurés, manuellement ou via DHCPv6, avec les adresses IPv6 embarquant une adresse IPv4 [[RFC 6052](#)]. Concrètement, cela signifie qu'un nœud IPv6 voit son interface réseau configurée avec 2 adresses IPv6 : une adresse IPv6 routable "classique" pour communiquer avec les autres nœuds de l'internet v6 et une adresse IPv6 embarquant l'adresse IPv4 allouée à ce nœud pour ses communications avec les nœuds de l'internet v4. On voit là apparaître la principale faiblesse de ce mode de traduction "sans état" : il consomme une adresse IPv4, car les nœuds IPv6 ont besoin d'une adresse IPv4 qui leur soit propre (de manière similaire aux nœuds en double pile).

La figure 4 représente le transfert d'un paquet du nœud IPv6 vers le nœud IPv4. Dans cette figure, H6 et H4 sont des adresses IPv4. Ces adresses trouvent leur correspondance dans l'espace d'adressage IPv6 en les préfixant par un préfixe IPv6 réservé à cet usage, noté "pref64". Du point de vue du routage, NAT64 annonce ce préfixe dans le réseau IPv6 pour recevoir le trafic à destination des nœuds IPv4. Il fait de même du côté IPv4 en annonçant une route pour les adresses IPv4 des nœuds IPv6.

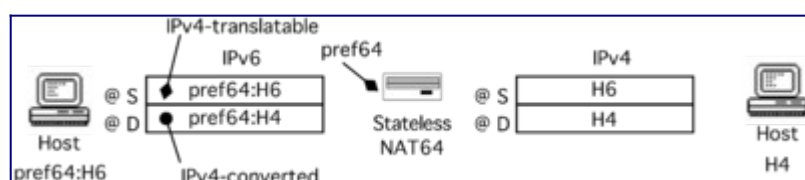


Figure 4 : Type des adresses utilisées pour un NAT64 "sans état".

Du fait de son caractère "sans état", ce traducteur passe mieux à l'échelle et il n'introduit pas de point de faiblesse pour les communications en respectant l'indépendance du réseau vis-à-vis des hôtes. Lorsque le réseau est indépendant des hôtes, une panne dans le réseau n'entraîne pas la réinitialisation des communications en cours. C'est un principe pour assurer la robustesse du système. Dans notre cas, la robustesse de la traduction dans le réseau peut être elle-même renforcée si plusieurs NAT64 sont déployés en parallèle. Cependant, le manque d'adresses IPv4 disponibles le rend difficilement utilisable, voire inutile[5]. Comme il va être nécessaire d'agréger plusieurs nœuds IPv6 sur une simple adresse IPv4, la solution s'oriente alors vers le traducteur "avec état".

NAT64 : traduction "avec état" [RFC 6146](#)

Décrit par le [RFC 6146](#), le NAT64 "avec état" possède une adresse IPv4 qu'il partage entre plusieurs systèmes IPv6. Il s'ensuit que l'algorithme de correspondance des adresses reposant sur une adresse IPv6 embarquant une adresse IPv4 défini dans le [RFC 6052](#) n'est plus applicable. À la place, un état est créé pour chaque flot de paquets pour mettre en correspondance cette adresse IPv4 avec des adresses IPv6. Comme pour le NAT44, le numéro de port est utilisé pour identifier les nœuds IPv6. La différence majeure avec le traducteur "sans état" porte sur une des adresses du paquet IPv6. Celle-ci n'est pas traduite en IPv4 par la méthode de traduction "sans état". Comme le décrit la figure 5, le NAT64 "avec état" utilise à la fois une traduction "avec état" et une traduction "sans état". Sur cette figure, l'hôte IPv6 d'adresse H6 émet un paquet à destination de l'hôte IPv4 d'adresse H4. N4 représente l'adresse IPv4 partagée que le traducteur utilise pour la représentation des adresses "source" IPv6 dans le monde IPv4. Le NAT64 annonce une route de préfixe pref64 pour recevoir le trafic IPv6 à destination du réseau IPv4.

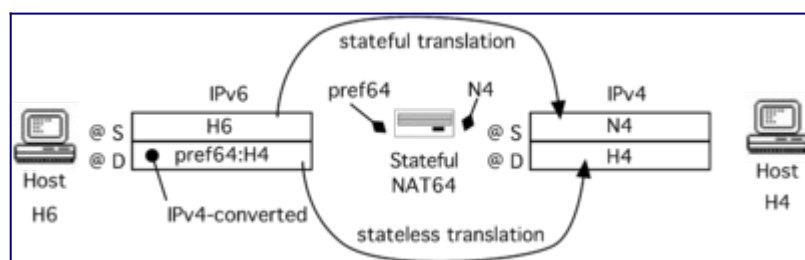


Figure 5 : Type des adresses utilisées pour un NAT64 "avec état".

Pour illustrer le fonctionnement conjoint du NAT64 et du DNS64, nous allons prendre l'exemple du déploiement d'un NAT64 "à état" sur le réseau mobile. Comme décrit au début de l'activité, le déploiement d'un réseau "seulement IPv6" peut s'avérer intéressant dans le cadre d'un réseau mobile type UMTS (3G). L'interopérabilité avec les services IPv4 peut alors être réalisée en traduisant les paquets IPv6 en paquets IPv4 à travers un dispositif NAT64, couplé à un relais-traducteur DNS64. L'intérêt d'un tel dispositif est qu'il est relativement simple à configurer côté équipement client : il suffit que celui-ci utilise l'adresse du DNS64 en tant que serveur de résolution de nom. La figure 6 présente la structure du réseau du point de vue IP. Le client est un mobile, souvent un smartphone, noté ME (*Mobile Equipment*) connecté à un réseau sans fil interconnecté avec l'infrastructure IP au moyen d'un routeur noté GGSN (*Gateway GPRS*

Support Node).

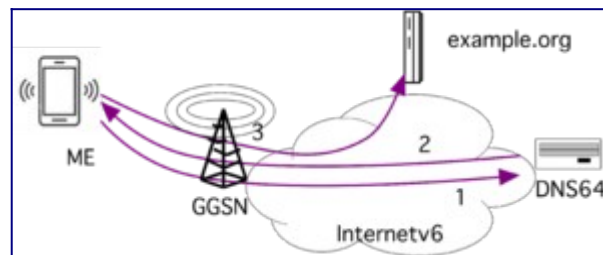


Figure 6 : Accès à un serveur en IPv6.

Le cas illustré par la figure 6 montre un échange en IPv6 entre le client ME et le serveur Web "example.org". Il s'agit des étapes classiques pour accéder à un serveur connu par son nom. Les étapes sont les suivantes :

1. Pour en connaître l'adresse IP, le client interroge le serveur de résolution de noms, en l'occurrence le dispositif DNS64. L'interrogation du client concerne les enregistrements IPv6 (AAAA) car ceux-ci sont les seuls qui seront utilisables depuis le client connecté sur un réseau IPv6 seul (étape 1).
2. Ce nom de domaine possède une résolution en IPv6 (il possède un enregistrement AAAA). Le dispositif DNS64 se comporte alors comme un "résolveur" de noms normal et transfère cet enregistrement au client en guise de réponse (étape 2).
3. Le client peut alors se connecter directement au service à partir de l'adresse IPv6 obtenue (étape 3).

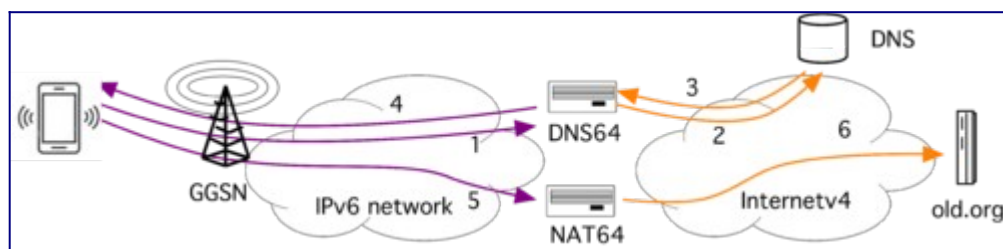


Figure 7 : Accès à un serveur en IPv4.

Dans la figure 7, le client ME cherche maintenant à joindre un autre service, comme "old.org" fonctionnant encore avec le protocole archaïque. Comme, ce service ne possède pas de connectivité IPv6, le couple DNS64/NAT64 va être impliqué pour rendre la communication possible. Voyons les différentes étapes pour réaliser la connectivité entre le client et ce serveur :

1. Comme précédemment, le client va interroger son "résolveur" de noms, le DNS64, sur la présence d'un enregistrement AAAA pour le service (étape 1).
2. Le DNS64 interroge le service DNS (étape 2) sur les différentes adresses disponibles.
3. Le DNS64 n'obtient que des adresses de type IPv4 (enregistrement A) (étape 3).
4. Ces enregistrements ne correspondent pas aux adresses attendues par le client. Le DNS64 va alors transformer les adresses IPv4 obtenues du service, en adresses IPv6 afin de satisfaire la demande du client. Cette traduction d'adresses se fait conformément

- au [RFC 6052](#). Dans notre exemple, le DNS64 complète le préfixe 64:ff9b::/96 avec l'adresse IPv4 obtenue (étape 4).
5. Le client utilise donc cette adresse IPv6 comme destinataire de la communication. Ainsi, le navigateur web demande à établir une connexion TCP avec comme adresse de destination, l'adresse ayant le préfixe 64:ff9b::/96. Ce préfixe est routé dans l'infrastructure du réseau mobile vers le dispositif NAT64. Celui-ci reçoit donc les paquets en provenance du client et à destination de l'adresse transformée par le DNS64 (étape 5).
 6. Le NAT64 avec état doit maintenant traduire ces paquets IPv6 en paquets IPv4. Il crée donc un en-tête IPv4 à partir des champs de l'en-tête IPv6, comme spécifié dans le [RFC 7915](#). Pour l'adresse destination du paquet IPv4, le traducteur applique la transformation inverse de celle appliquée par le DNS64 : il extrait l'adresse IPv4 en soustrayant de l'adresse destination du paquet IPv6, le préfixe utilisé pour la traduction d'adresse dans l'infrastructure mobile, en l'occurrence 64:ff9b::/96. Il s'agit d'effectuer une traduction d'adresse sans état. Concernant l'adresse de source du paquet IPv4, la traduction d'adresse doit se faire avec état. L'adresse IPv6 du client mobile doit être mise en correspondance avec une adresse IPv4 du jeu d'adresses (*pool* d'adresses) réservées à cet usage par le NAT64. Comme l'adresse IPv4 peut être partagée entre les clients du réseau IPv6, le traducteur va aussi utiliser le numéro de port source pour identifier le flux du nœud ME. On nommera alors la combinaison d'un numéro de port TCP avec l'adresse IP comme l'adresse de transport. Le traducteur NAT64 va conserver dans un état, la correspondance de l'adresse de transport IPv6 avec l'adresse de transport IPv4 choisie. Cet état va servir également dans le sens retour à effectuer la traduction inverse à savoir lorsqu'un paquet IPv4 sera reçu, à traduire l'adresse de destination du paquet IPv4 en son équivalent pour le paquet IPv6. Après avoir fait ces traitements et mémoriser les informations nécessaires à la traduction, le NAT64 est en mesure de transmettre les paquets IPv6 du mobile qu'il recevra sous la forme de paquets IPv4 vers le service "old.org" (étape 6).

Selon les cas d'utilisation indiqués par le [RFC 6144](#), les détails de la configuration d'un réseau comportant un traducteur NAT64 sont décrits dans cet article[\[6\]](#).

Conclusion

Le déploiement de réseaux seulement en IPv6 apporte la réponse au manque d'adresses IPv4 mais pose le problème de l'accès aux services restés en IPv4. La traduction de paquets comme opérée par NAT64 offre une alternative pour les applications qui sont indépendantes du format d'adresse IP au niveau de leur protocole applicatif (si celui-ci ne transporte pas d'adresses IP). Sous cette condition, le dispositif de traduction NAT64 s'utilise de façon quasi transparente. Aucune modification du client ou du serveur n'est requise. Tout est fait dans le traducteur. Cependant, ce dispositif souffre de certains inconvénients du NAT44, comme une faible capacité à passer à l'échelle pour les traducteurs "à état", ou du partage des adresses IPv4 [\[RFC 6269\]](#). Il faut de plus noter, dans le cas d'un client IPv6, que les applications et les

protocoles utilisés par ce client devront être compatibles avec IPv6. Lorsque cette compatibilité n'existe pas, le client ne pourra pas alors profiter de l'interopérabilité rendue possible par le NAT64. Il demandera d'autres solutions de transition reposant sur une adresse IPv4, telle que la double traduction 464xlat [[RFC 6877](#)].

Il peut paraître contradictoire d'utiliser IPv6 pour se passer de la traduction ou de la double traduction d'IPv4 pour, en fait, retrouver des traducteurs dans les communications. Tout d'abord, il faut noter que cette solution se veut transitoire. Dans l'article[7], les auteurs avancent que NAT64 doit se voir comme une évolution du NAT44 servant à éviter l'utilisation d'un étage de traduction (NAT444). De plus, le nombre de services accessibles uniquement par IPv4 va diminuer au fur et à mesure qu'IPv6 va se diffuser dans l'internet. Cette évolution dans le temps va entraîner une diminution du trafic IPv4 au profit du trafic IPv6. Au contraire de ce qui se passe aujourd'hui dans l'internet avec IPv4, les dispositifs de traduction vont être de moins en moins sollicités.

Bien que NAT 64 ne soit pas une solution universelle [[RFC 7269](#)], il se développe de plus en plus car il devient intéressant aujourd'hui de pouvoir déployer des réseaux seulement IPv6 à la place de réseaux IPv4 privés, notamment quand l'espace d'adressage privé n'est plus suffisant pour adresser l'ensemble des nœuds. Certains opérateurs mobiles ont notamment fait ce choix pour leur réseau (comme T-Mobile aux USA). De plus, ce mécanisme constitue le composant essentiel pour la migration vers IPv6 dans la situation actuelle de l'internet (épuisement effectif des adresses IPv4 disponibles et forte inertie pour la migration des nœuds IPv4). Les solutions de traduction comme NAT64 trouvent donc leur intérêt pour que des nœuds IPv6 accèdent aux contenus disponibles sur IPv4.

Références bibliographiques

1. ↑ Bortzmeyer, S. (2008). [Le groupe de travail BEHAVE de l'IETF](#)
2. ↑ 3GPP 3rd Generation Partnership Project [3GPP](#)
3. ↑ Bagnulo, M.; Garcia-Martinez, A. and Van Beijnum, I. (2012). IEEE Communications Magazine, Vol. 50, No. 7, July. [The NAT64/DNS64 tool suite for IPv6 transition](#)
4. ↑ Cisco. (2011). White paper. [NAT64—Stateless versus Stateful](#)
5. ↑ Pepelnjak, I. (2011). Blog IP space. [Stateless NAT64 is useless](#)
6. ↑ Cisco. (2012). White paper. [NAT64 Technology: Connecting IPv6 and IPv4 Networks](#)
7. ↑ Boucadair, M.; Binet, D. et Jacquenet, C. (2011). Techniques de l'ingénieur. [Transition IPv6 - Outils et stratégies de migration](#)

Pour aller plus loin

RFC et leur analyse par S. Bortzmeyer

- [RFC 6052](#) IPv6 Addressing of IPv4/IPv6 Translators [Analyse](#)
- [RFC 6144](#) Framework for IPv4/IPv6 Translation [Analyse](#)
- [RFC 6146](#) Stateful NAT64: Network Address and Protocol Translation from IPv6 Clients to IPv4 Servers [Analyse](#)

- [RFC 6147](#) DNS64: DNS extensions for Network Address Translation from IPv6 Clients to IPv4 Servers [Analyse](#)
- [RFC 6269](#) Issues with IP Address Sharing [Analyse](#)
- [RFC 6333](#) Dual-Stack Lite Broadband Deployments Following IPv4 Exhaustion [Analyse](#)
- [RFC 6877](#) 464XLAT: Combination of Stateful and Stateless Translation
- [RFC 7051](#) Analysis of Solution Proposals for Hosts to Learn NAT64 Prefix
- [RFC 7050](#) Discovery of the IPv6 Prefix Used for IPv6 Address Synthesis [Analyse](#)
- [RFC 7269](#) NAT64 Deployment Options and Experience [Analyse](#)
- [RFC 7757](#) Explicit Address Mappings for Stateless IP/ICMP Translation
- [RFC 7915](#) IP/ICMP Translation Algorithm [Analyse](#)
- [RFC 8106](#) IPv6 Router Advertisement Options for DNS Configuration [Analyse](#)
- [RFC 8781](#) Discovering PREF64 in Router Advertisements [Analyse](#)
- [RFC 8880](#) Special Use Domain Name 'ipv4only.arpa' [Analyse](#)

Activité 44 : Interopérer des applications par passerelles applicatives

Contexte d'utilisation des passerelles applicatives

Il n'existe pas une solution magique à tous les problèmes. Le déploiement bien trop lent d'IPv6 a laissé une situation peu satisfaisante face au manque d'adresses IPv4. La migration vers IPv6 ne pourra pas se faire sans la traduction. Comme nous l'avons vu, la traduction au niveau réseau à l'aide de NAT64 est un dispositif qui vise à faciliter le déploiement des clients IPv6, tout en étant aussi utilisable pour rendre les serveurs IPv4 accessibles à l'Internet v6. Si NAT64 est une solution fonctionnelle pour la communication avec des systèmes IPv4, le retour d'expérience rapporté par les [RFC 6586](#) et [RFC 7269](#) montre que certaines applications ne fonctionnent plus lorsque leurs communications passent par un NAT64. C'est par exemple le cas de la signalisation de la téléphonie : les adresses IP sont transmises dans la signalisation, et ne sont pas traduites par NAT64. Lorsque l'utilisation de NAT64 conduit à une situation d'échec, le recours à une passerelle applicative constitue une alternative pour les applications dont l'installation d'un relais intermédiaire est possible.

Outre la résolution de certains défauts de fonctionnement, la solution de la passerelle applicative offre une technique d'interopérabilité moins intrusive que NAT64 au niveau de l'infrastructure de communication. En effet, déployer NAT64 demande de modifier le routage et d'allouer des adresses. Le déploiement du NAT64 est transparent pour les hôtes mais nécessite des modifications au niveau de l'infrastructure de communication. Dans le cas du déploiement d'une passerelle applicative, nous sommes dans une situation inverse. Les modifications sont à apporter uniquement dans la configuration des hôtes : installation de la passerelle, mais aussi du client qui, dans certains cas, doit être configuré pour déléguer ses requêtes à la passerelle, à l'instar du navigateur web dont on configure la référence du proxy par exemple. Ainsi, il est possible, avec une passerelle applicative, d'avoir un déploiement progressif d'IPv6 dans le réseau, sans perturber les services en place. Dans le cadre d'une infrastructure de communication en production, cette caractéristique peut être appréciée.

Enfin, dans le cas d'un client IPv4 qui se connecte à des serveurs de l'Internet v6, la passerelle applicative est de nos jours la seule méthode d'interopérabilité. Mais il est vrai que ce scénario n'est pas encore d'actualité au vu de l'état du déploiement de l'Internet v6. Nous allons détailler, dans la suite de cette activité, les scénarios d'utilisation de ce dispositif dans le cas d'un client IPv6 avec un serveur IPv4.

Principe des passerelles applicatives

Les passerelles applicatives, ou ALG (*Application Layer Gateway*), représentent le moyen le plus simple pour assurer une relation entre le monde IPv4 et le monde IPv6. Il s'agit de machines avec une double pile (cf. figure 1) configurées pour accéder aux deux versions du protocole. Les clients IPv6 émettent leurs requêtes vers la passerelle applicative comme s'ils s'adressaient directement au service. La passerelle interprète le contenu de ces requêtes pour

les retransmettre ensuite en IPv4 à destination du service concerné.

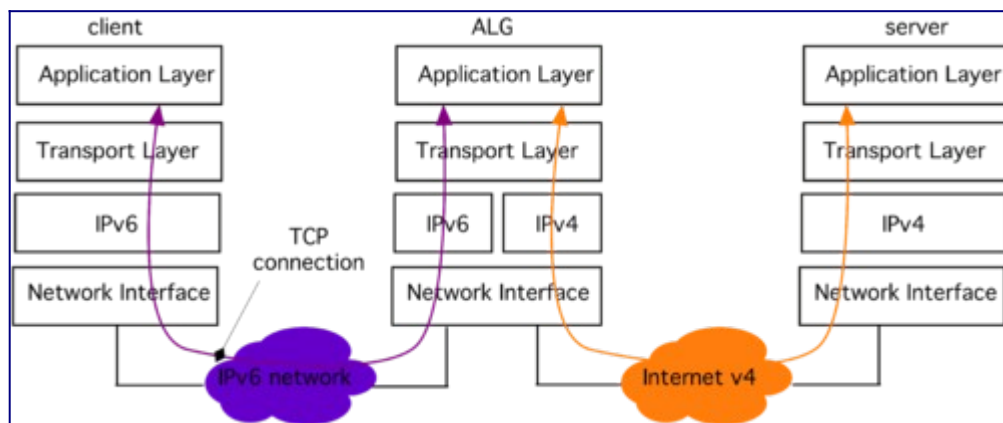


Figure 1 : Communication par passerelle applicative.

Une ou plusieurs passerelles peuvent être installées en fonction des services rendus disponibles sur le réseau (par exemple : serveur d'impression, serveur de messagerie, web, etc.). Les machines clientes doivent être configurées pour adresser leurs requêtes applicatives à ces passerelles.

L'usage de ces techniques est très fréquent dans les réseaux privés pour communiquer avec l'extérieur. Tous les protocoles ne peuvent pas utiliser les passerelles applicatives. Certains protocoles ne sont pas prévus pour intégrer un relais intermédiaire (par exemple *telnet*). D'autres protocoles, par leur nature propriétaire, ne permettent pas le développement de passerelles par une tierce partie si celle-ci n'est pas disponible (comme par exemple *Skype*). Mais, comme la liste suivante l'indique, les ALG concernent des applications courantes qui représentent une proportion importante du trafic. Cela permet également d'alléger le travail d'autres mécanismes de transition qui sont plus complexes à mettre en œuvre. Les passerelles applicatives regroupent :

- les *proxies* et les caches web ;
- les *spoolers* d'impression ;
- les serveurs de courrier électronique ;
- les serveurs DNS ;
- ...

Cas du service Web

Il s'agit ici de faire communiquer des clients avec des services Web ; client et serveur utilisant une version différente du protocole IP. La passerelle applicative utilisée dans ce cas est un relais HTTP qui va interpréter les requêtes des clients pour les retransmettre vers le serveur Web. Deux modèles de déploiement existent pour ce type de relais :

- le déploiement d'un serveur mandataire (*proxy*) dans le réseau des clients, leur permettant d'atteindre les serveurs extérieurs, dont ceux qui n'utilisent pas la même version du protocole IP ;
- le déploiement d'un relais inverse (*reverse proxy*) dans le réseau du serveur, permettant

d'accepter les requêtes des clients qui n'utilisent pas la même version du protocole IP que le serveur.

ALG placée du côté du client

Le relais HTTP est ici localisé dans le réseau des clients, généralement dans la DMZ du site ou sur le routeur domestique, comme le montre la figure 2. Les clients sont configurés pour utiliser cette passerelle en tant que serveur mandataire afin d'atteindre les services Web extérieurs. Ce type de déploiement est couramment utilisé pour sécuriser les clients d'accès Web vers des sites malveillants.

Afin de permettre l'interopérabilité entre les différentes versions du protocole IP, la passerelle est connectée et configurée sur un réseau "double pile". Si, par exemple, les clients sont sur un réseau seulement IPv6, l'adresse IPv6 de la passerelle leur est indiquée en tant que serveur mandataire. La passerelle recevra alors les requêtes HTTP de ces clients et les relaiera vers les services demandés en IPv4 ou en IPv6 selon le protocole utilisé par le serveur.

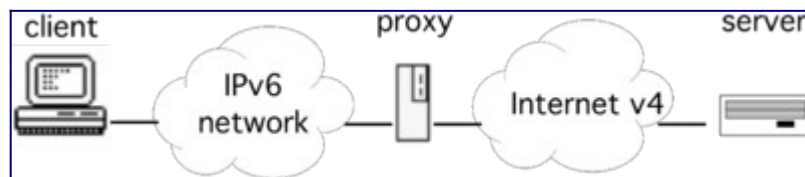


Figure 2 : Exemple de passerelle applicative placée du côté client.

Le listing suivant donne un extrait de la configuration d'un serveur Apache pour que celui-ci serve de relais aux requêtes émises par des navigateurs. Aucune configuration n'est relative au protocole IPv6. Il suffit d'activer la fonction de proxy.

```
#cat /usr/local/etc/apache/httpd.conf
#
# Proxy Server directives. Uncomment the following lines to
# enable the proxy server:
#
ProxyRequests On

Order deny,allow
Allow from all

#
# Enable/disable the handling of HTTP/1.1 "Via:" headers.
# ("Full" adds the server ver.;"Block" removes all outgoing Via: headers)
# Set to one of: Off | On | Full | Block
#
ProxyVia On

# End of proxy directives.
```

ALG placée du côté du service

La problématique ici à résoudre est de rendre un service Web accessible avec les deux versions du protocole IP alors que celui-ci n'en utilise qu'une seule. S'ajoute à cette problématique la contrainte opérationnelle du service : le fonctionnement du site Web sera-t-il

perturbé par l'intégration d'IPv6 ? L'expérience utilisateur des visiteurs va-t-elle être impactée ?

Pour rendre accessible un service Web en IPv6, la solution la plus simple consiste à activer la connectivité IPv6 sur le réseau où est connecté ce service, ainsi que sur la machine qui l'héberge. Mais cette solution pose un ensemble de problèmes opérationnels car l'infrastructure d'hébergement d'un site Web peut être assez complexe (système d'équilibrage de charge ou *load balancers*, cache, etc.). Une réelle étude du passage à IPv6 de cette infrastructure peut être nécessaire pour effectuer une transition pérenne. Le [RFC 6589](#) s'intéresse à cette problématique et délivre un ensemble de conseils pour les hébergeurs qui veulent rendre leurs serveurs accessibles en IPv6.

Déploiement d'un relais inverse

Une solution moins coûteuse et plus rapide à mettre en œuvre (mais avec bien sûr quelques limitations) consiste à déployer un relais inverse (*reverse-proxy*) proche du serveur, comme montré par la figure 3. Le rôle de ce relais est d'accepter les requêtes vers le service Web utilisant la version du protocole qui n'est pas encore déployée sur le serveur. Les clients envoient leur requête au relais de manière transparente, comme s'il s'agissait du service. Le relais se charge, pour le client, de transférer les requêtes vers le serveur et de recevoir sa réponse en utilisant le protocole IP déployé sur le serveur.

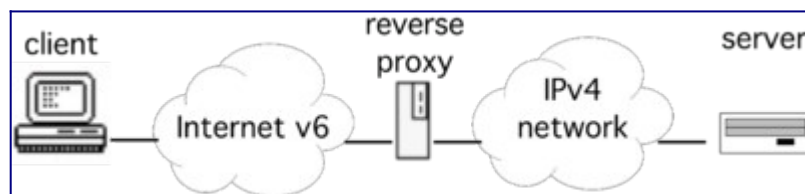


Figure 3 : Exemple de passerelle applicative placée du côté serveur.

Dans la mise en œuvre du relais inverse, une étape importante consiste en la configuration du DNS. En effet, l'adresse du relais doit être renseignée comme l'un des enregistrements pour le service concerné. Ainsi, par exemple, pour un service seulement accessible en IPv4, l'adresse IPv6 du relais sera renseignée comme enregistrement AAAA au même niveau que l'enregistrement A de l'adresse du serveur.

Le listing suivant donne un extrait de la configuration d'un relais inverse opéré par le logiciel [nginx](#). La configuration consiste à indiquer le renvoi des requêtes Web reçues en IPv6 vers le serveur resté joignable en IPv4.

```
#cat /etc/nginx/sites-available/default
...
location / {
    proxy_pass http://192.0.2.1/;
}
```

Dans le contexte initial, le service Web n'est accessible qu'en IPv4. L'adresse IPv4 du service (notée S4) est enregistrée dans le DNS. Celle-ci est récupérée par les clients à partir du nom du service afin d'initier une connexion directe vers le serveur, comme montrée dans la figure 4.



Figure 4 : Accès direct pour les clients IPv4.

Le scénario d'intégration d'IPv6 par un relais inverse pour un service Web passe par deux actions, comme représenté par la figure 5 :

- la mise en place d'un relais inverse dans l'infrastructure du service, sur un réseau "double pile" ;
- l'enregistrement de l'adresse IPv6 du relais (notée S6) comme l'adresse IPv6 officielle du serveur.

Un client possédant une connectivité IPv6 et souhaitant consulter le service va résoudre le nom du service en deux adresses : une IPv4 et une IPv6. La préférence à IPv6 du navigateur lui fera utiliser en priorité cette adresse. Sa requête se fera alors de manière transparente à destination du *reverse proxy* comme indiqué par la figure 5.

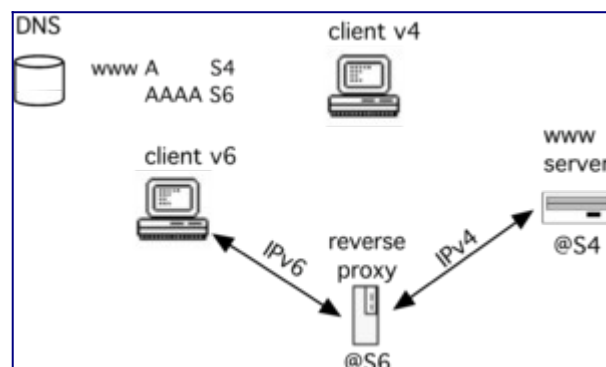


Figure 5 : Accès par le relais inverse pour les clients IPv6.

Le relais inverse propose donc une solution simple pour assurer une interopérabilité de son service Web avec IPv6. Cependant, elle n'est pas adaptée à des sites à large audience. Même largement dimensionné, un unique relais ne pourrait pas absorber la portion IPv6 des requêtes, même si celle-ci est encore en dessous des 10 %. De plus, le relais constitue un point de faiblesse unique (SPOF, *Single Point of Failure*) pouvant compromettre l'accès au service.

Utilisation d'un service d'hébergement ou de distribution des contenus

Pour ces sites à large audience, plusieurs solutions peuvent être envisagées pour permettre l'interopérabilité avec IPv6 [[RFC 6883](#)] :

- migrer son infrastructure d'hébergement en "double pile" (comme mentionné plus haut, cette solution est la plus complexe) ;
- faire appel à un service d'hébergement offrant une connectivité "double pile" ;
- continuer à héberger son service en IPv4, mais utiliser un réseau de distribution de

contenus (CDN, *Content Delivery Network*) "double pile".

Les deux dernières solutions permettent au responsable du service de déléguer la complexité de l'intégration et de la gestion d'IPv6 à un prestataire extérieur. Ces services sont aujourd'hui assez répandus. Les hébergeurs de sites Web offrent maintenant couramment un accès "double pile" aux services hébergés, que ce soit sur des offres de serveurs mutualisés ou dédiés. Toutes les prestations d'hébergement des acteurs majeurs en France que sont OVH, Gandi ou Online, intègrent IPv6 dans leurs offres.

Les réseaux de distribution de contenus (ou CDN) ont pour objectif de répliquer le contenu du service en différents points stratégiques du réseau, permettant aux utilisateurs d'accéder plus rapidement au service et à l'infrastructure du service d'être soulagée d'une partie du trafic. Les CDN peuvent, de plus, permettre l'interopérabilité avec IPv6 en jouant le même rôle que le relais inverse vu précédemment, avec bien sûr une infrastructure plus robuste. Des services de CDN comme Akamai, CloudFlare ou Cedexis permettent ainsi d'offrir des contenus en IPv6 alors que ceux-ci sont hébergés sur des services seulement IPv4.

Conclusion

Passage à l'échelle

Le passage à l'échelle, dans ce contexte, signifie une croissance de la taille, soit en nombre de clients du service applicatif, soit en terme de volume de flux. La mise en place d'une passerelle applicative ajoute un relais protocolaire dans la chaîne de communication entre le client et le serveur applicatif. Bien que ce relais puisse être fonctionnel et transparent, la montée en charge peut poser problème. La capacité du relais étant finie et limitée, il peut introduire des défauts à partir d'un certain nombre de clients ou d'une certaine quantité de trafic.

Les passerelles applicatives offrent un moyen simple d'interopération entre des clients et des serveurs qui n'utilisent pas la même version du protocole IP. Parce qu'elles interprètent le contenu du paquet dans la couche d'application, elles sont transparentes pour l'infrastructure de communications (routeurs). Elles ne demandent pas de modifications au niveau du réseau. Cependant, les passerelles applicatives posent des contraintes qui limitent leur usage, telles que :

- introduction d'un délai pour le traitement des paquets ;
- difficultés à passer le facteur d'échelle, et possibilité de congestion ;
- applications non conçues pour fonctionner avec un relais intermédiaire.

En effet, des protocoles propriétaires ainsi que certains protocoles assurant la confidentialité des communications peuvent rendre impossible la mise en œuvre d'un tel dispositif (pour un protocole de sécurité, une telle passerelle pourrait s'apparenter à un "homme au milieu"). De plus, selon le protocole utilisé, la mise en œuvre d'une telle passerelle peut s'avérer complexe. Par exemple, le protocole SIP nécessite une interprétation de l'ensemble de la signalisation. Enfin, une passerelle applicative n'est pas forcément le meilleur choix si le protocole applicatif embarque des adresses IP.

Pour aller plus loin

RFC et leur analyse par S. Bortzmeyer

- [RFC 6144](#) Framework for IPv4/IPv6 Translation [Analyse](#)
- [RFC 6384](#) An FTP Application Layer Gateway (ALG) for IPv6-to-IPv4 Translation
- [RFC 6586](#) Experiences from an IPv6-Only Network [Analyse](#)
- [RFC 6589](#) Considerations for Transitioning Content to IPv6 [Analyse](#)
- [RFC 6883](#) IPv6 Guidance for Internet Content Providers and Application Service Providers [Analyse](#)
- [RFC 7269](#) NAT64 Deployment Options and Experience [Analyse](#)

Conclusion

La croissance de l'internet a rendu IPv4 obsolète. Le nouveau protocole IPv6 vise à retrouver le principe de "bout en bout". Ce principe fondateur de l'internet a assuré son succès. C'est par ce principe que l'internet est devenu une source d'innovation et le support de l'économie du numérique. La migration d'IPv4 vers IPv6 est bien plus qu'un simple changement de tuyau. C'est tout l'écosystème qui est appelé à évoluer. Aussi, la sensibilisation de tous les acteurs à la problématique de la migration est cruciale. Le déploiement d'IPv6 se conduit, comme un projet, avec une planification. Il touche tous les métiers du système d'information.

Le déploiement d'IPv6 doit se faire en tenant compte de l'existant et de manière progressive. IPv6 est appelé à coexister avec IPv4. Autrement dit, il est une évolution d'IPv4 et non le moyen de faire un Internet parallèle et disjoint de l'existant. Pour maintenir cette connectivité globale, IPv6 comporte des mécanismes transitoires pour qu'il puisse interopérer avec IPv4. Ces mécanismes sont maintenant connus. Ils sont responsables en grande partie de l'image de complexité que peut dégager le passage à IPv6. Cependant, ils ne sont pas tous à utiliser : il faut retenir celui qui permet de faire interopérer IPv6 avec son système de communication. Au cours de cette séquence, nous avons présenté les techniques d'intégration sur lesquelles s'appuient les mécanismes d'intégration proposés à savoir :

- la double pile, pour avoir un nœud capable de communiquer dans les 2 versions du protocole IP ;
- le tunnel, pour interconnecter des nœuds IPv6 par des liens virtuels en IPv6, établis sur des liaisons réelles en IPv4 ;
- la traduction, pour qu'un nœud avec une version du protocole IP puisse communiquer avec un nœud avec l'autre version du protocole IP. Cette situation arrive lorsque la double pile ne peut plus être utilisée du fait du manque d'adresses IPv4, ou pour rendre des services accessibles à IPv6 sans avoir à mettre à jour le serveur.

Les mécanismes d'intégration étudiés dans ce cours sont 6RD en utilisant le tunnel et NAT64/DNS64 reposant sur la traduction.

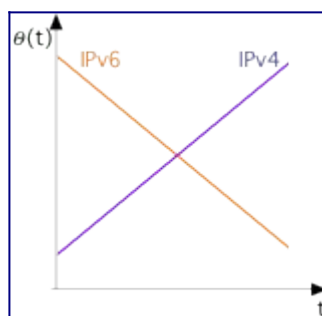


Figure 1 : Évolution du coût opérationnel

L'usage de ces techniques est appelé à diminuer au fur et à mesure de l'extinction d'IPv4. Contrairement à IPv4, qui était partie d'une table rase, IPv6 doit tenir compte de l'existant, ce qui particularise et complexifie son déploiement initial. Mais, contrairement à IPv4, la connectivité IPv6 va devenir de plus en plus simple. L'évolution du coût opérationnel, autrement dit de la complexité, pour chacune des versions du protocole IP, peut se schématiser comme

indiqué par la figure 1.

Bien qu'IPv6 existe depuis longtemps, le déploiement s'est accéléré ces dernières années en même temps que la pénurie d'adresses IPv4 est devenue plus marquée du fait de l'épuisement des adresses IPv4 disponibles. Aussi, IPv6 est devenu inévitable à court terme. Ce n'est pas une expérience de laboratoire et s'en préoccuper tardivement ne fait qu'augmenter la complexité et le coût de son déploiement. L'objectif final du déploiement d'IPv6, c'est d'avoir IPv6 partout dans l'internet et ainsi d'avoir des potentialités de croissance et d'innovation.

Comme, aujourd'hui, les réseaux IPv6, seuls ou déployés conjointement avec IPv4, deviennent de plus en plus courant, il est important d'avoir les bonnes pratiques de déploiement et d'administration qui émergent progressivement. Il est donc important de se tenir informé, de partager et d'adapter ses propres pratiques en fonction des expériences de chacun.

Références bibliographiques

Pour en savoir plus

Des vidéos sur la transition :

- [Transition mechanisms](#) by RIPE
- [Comment assurer une transition heureuse](#) par S. Bortzmeyer (2011)
- [6DEPLOY-2 e-Learning and IPv6 in 5 minutes](#)

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Stéphane Bortzmeyer pour ses analyses de RFC sur IPv6 (<http://www.bortzmeyer.org/>) dont des extraits ont été utilisés pour ce cours.