

Exemples de mise en œuvre du protocole IPv6 et de services associés sur le réseau régional SYRHANO (Haute-Normandie)

Hervé Prigent

CRIHAN

745 avenue de l'Université, 76800 Saint-Etienne du Rouvray

Herve.Prigent@crihan.fr

date: 8 Octobre 2003

Thomas Carlu

CRIHAN

745 avenue de l'Université, 76800 Saint-Etienne du Rouvray

Thomas.Carlu@crihan.fr

Résumé

Le réseau régional multi usages SYRHANO irrigue depuis 10 ans les principaux sites universitaires et les grandes écoles de Haute-Normandie. Au fil des ans, l'ensemble des établissements scolaires du second degré a été intégré au dispositif et SYRHANO s'est petit à petit ouvert à d'autres communautés d'utilisateurs. Pour répondre à leurs attentes, l'éventail des services a été élargi et le niveau global de qualité de service a été élevé. Afin de devancer les besoins, le CRIHAN, maître d'œuvre du réseau SYRHANO, a fait de la mise en œuvre du protocole IPv6 et du déploiement de services associés un des axes importants de l'évolution du réseau régional, dans la lancée de RENATER et de GEANT. Mais la tâche n'est pas aisée, pour de multiples raisons...

Mots clefs

IPv6, SYRHANO, RENATER.

1 Introduction

1.1 L'évolution du réseau normand en 2003 : SYRHANO « 2.1 »

L'association CRIHAN a été créée fin 1991 à l'initiative du Conseil Régional de Haute-Normandie, pour aider les organismes publics et privés de la région à développer des activités d'enseignement, de recherche et de développement basées sur l'utilisation des nouvelles technologies de communication et sur l'informatique. Quatre thématiques principales sont proposées : les réseaux informatiques, le calcul numérique intensif, la formation et le soutien à des projets innovants. Le CRIHAN est ainsi responsable du déploiement du réseau régional SYRHANO, avec un double mandat de l'Etat et de la Région Haute-Normandie.

SYRHANO irrigue depuis 10 ans les principaux sites universitaires et les grandes écoles et depuis bientôt sept ans l'ensemble des établissements scolaires du second degré. Au fil des ans, SYRHANO a constitué l'épine dorsale de l'Internet non-marchand de notre région. En 2003, il devient réellement multi usages et multi opérateurs de par sa construction modulaire et s'ouvre à d'autres communautés comme celles de la Santé, de la Culture et de l'Administration.

Le CRIHAN a en effet conçu une architecture qui exploite la variété des compétences et des technologies aujourd'hui disponibles dans le monde des réseaux. Cette nouvelle articulation des savoir-faire autour de la plate-forme régionale en fait un des outils de communication régionale les plus performants :

- **Plus de débit** : la capacité potentielle de l'épine dorsale régionale passe de quelques centaines de Mbit/s à 2,5 Gbit/s. Elle est constituée d'une boucle optique sécurisée¹ qui relie des points de présence primaires au Havre, à Rouen et à Evreux. Dans le même temps, le débit de raccordement de SYRHANO sur le réseau national RENATER est considérablement augmenté et passe à 1 Gbit/s.
- **Une meilleure couverture régionale** : des points de concentration (PC) supplémentaires sont créés en Région. Ainsi, grâce à des liaisons BLR (4), deux PC sont mis en service à Vernon et Elbeuf dès l'été 2003², et d'autres implantations seront étudiées en fonction de l'expression des besoins locaux.

¹ Service fourni par Télécom Développement

² Service fourni par Altitude Télécom

Sur agglomération rouennaise, InterCampus³ continue son extension en centre ville (pôle universitaire «Pasteur»), sur le campus nord (IUFM) et sur le Technopôle du Madrillet.

- **Les services de collecte secondaire sont enrichis** : les établissements scolaires se voient proposer des liaisons plus rapides⁴ que le RNIS utilisé précédemment :
 - un service ADSL réalisé sur mesure par le CRIHAN et le Rectorat leur permet d'utiliser les nouvelles applications comme la visioconférence,
 - les premiers raccordements par satellite sont en cours,
 - les raccordements par boucle locale radio (BLR)⁵ sont possibles sur tous les PC SYRHANO (point de concentration).
 - Collecte RNIS sur Evreux, Rouen et Le Havre (NIS)
- **Des fournisseurs d'accès Internet complémentaires** : Le NERO (Nœud d'Echange Régional pour les Opérateurs) est un mini GIX qui permet d'optimiser les flux Internet en région ; NERO offre désormais une sortie vers l'Internet alternative à celle de RENATER.
- **Plus de services...** :
 - Des classes de services peuvent être utilisées pour hiérarchiser les priorités des applicatifs
 - Des techniques de sécurité élaborées sont déployées sur le réseau sans dégradation de performances.
 - Des réseaux privés virtuels peuvent être déployés sur l'ensemble du réseau, permettant ainsi aux établissements d'utiliser relativement simplement l'infrastructure réseau mutualisée pour réaliser l'interconnexion logique de leurs sites distribués sur le territoire régional. Les VPN permettent également de rendre étanches plusieurs réseaux thématiques partageant la même épine dorsale de transport.
 - Enfin, le déploiement d'IPv6 est envisagé de manière native sur l'ensemble des équipements de SYRHANO.
- **...pour une communauté élargie d'utilisateurs** : tous les services sont désormais ouverts aux communautés des domaines de la Santé, de la Culture et de l'Administration : avec le monde de l'enseignement supérieur et secondaire, c'est ainsi l'ensemble du domaine non marchand régional qui se voit proposer un service réseau de qualité.

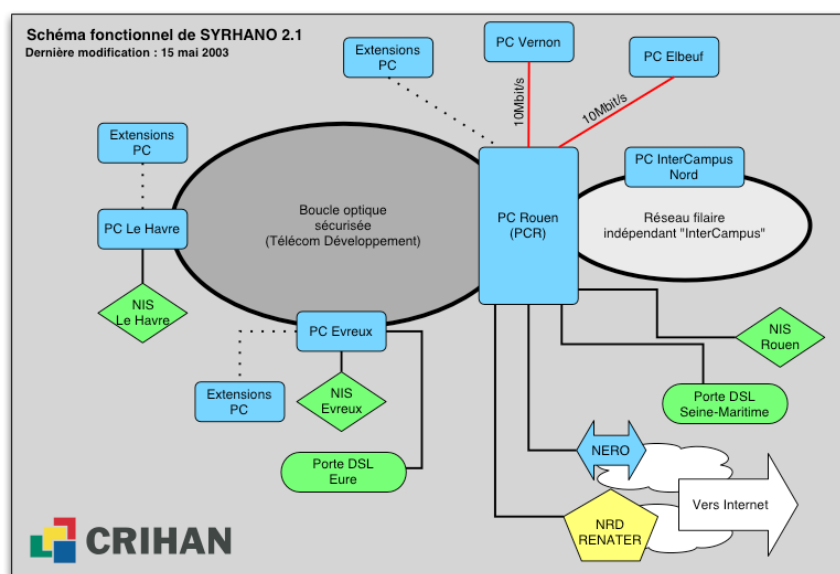


Figure 1 – schéma fonctionnel du réseau régional SYRHANO

³ Le CRIHAN a reçu en 2000 une licence d'exploitation de réseau filaire indépendant pour interconnecter les campus de Mont Saint Aignan et les sites du Technopôle du Madrillet à Saint Etienne du Rouvray. Ce réseau optique privé « InterCampus » a été étendu au site universitaire «Pasteur» au centre de Rouen en 2001 et au lycée Le Corbusier début 2003 : il a vocation à rejoindre d'autres sites comme l'IUFM à Mont Saint Aignan ou encore la faculté de Médecine et l'Ecole d'Architecture vers l'Est. Voir <http://www.crihan.fr/reseau/IC/ic.html>.

⁴ Services basés sur des offres de transport de France Télécom et d'Infosat/Eutelsat

⁵ Service fourni par Altitude Télécom

1.2 Les objectifs de déploiement d'IPv6

Les évolutions de SYRHANO présentées dans cette introduction répondent à des attentes précises de la part des financeurs du réseau et à des demandes explicites venant des utilisateurs. Que ce soit l'ajout d'un point de présence, l'augmentation des débits des liaisons ou la mise en place de réseaux privés virtuels, ces demandes sont facilement justifiables et leur utilisation – ou les effets de leur déploiement – mesurables a posteriori.

Le transport d'IPv6 ne correspond à aucune demande explicite des utilisateurs. Encore moins son transport natif. Son déploiement n'est pour le moment justifié que pour acquérir un savoir-faire et préparer les administrateurs réseau des sites connectés sur SYRHANO aux évolutions annoncées de l'Internet. Or ces évolutions stratégiques sont parfois justifiées pour des raisons qui peuvent être contestées :

- Disponibilité de plages d'adresses IPv4 : il est en effet de plus en plus difficile d'obtenir des adresses v4 sans justifier d'un plan de déploiement tellement précis qu'il frôle le ridicule. Cependant, pour beaucoup d'utilisateurs, ce n'est pas vraiment un problème car leurs besoins sont limités et la solution miracle s'appelle NAT.
- Services évolués (sécurité, facilité de configuration des équipements, VPN, etc.) : tous ces services sont aujourd'hui proposés sur v4 et satisfont la plupart de nos utilisateurs. Il est certes parfois difficile de concilier plusieurs demandes mais une solution technique est presque toujours trouvée pour satisfaire leurs attentes.
- Ouverture, égalité de traitement et facilité de communication pair à pair sont les valeurs fondatrices de l'Internet mais sont maintenant considérées comme des failles de sécurités importantes quand on lit les magazines spécialisés et qu'on écoute les responsables techniques de sites (par ailleurs souvent équipés avec des systèmes d'exploitation peu sûrs et des équipements réseaux exotiques). Venus à IP sur le tard voire quelque peu forcés, beaucoup considèrent NAT comme une technique simple à mettre en œuvre et qui leur permet de résoudre plusieurs problèmes simultanément :
 - le plan d'adressage de leur site peut se faire avec des adresses privées dont ils ont l'entière maîtrise ;
 - l'accès vers leur site est par défaut interdit ;
 - l'ouverture de services se fait au cas par cas et est limitée ;
 - les échanges pair à pair sont possibles en interne (parfois) mais pas avec le monde extérieur.

Qui plus est, déployer NAT et quelques adresses publiques est un bon moyen pour répondre aux utilisateurs qui souhaitent accéder à un service de visioconférence ou tout simplement travailler avec quelques autres collègues (je pense à ces chercheurs qui voulaient juste partager des fichiers avec ftp) que « la technologie actuelle ne le permet pas ».

Qu'à cela ne tienne, déployer IPv6 est nécessaire pour assurer une migration douce (en tous cas la plus transparente possible) vers d'éventuelles nouvelles applications, pour intégrer les technologies nouvelles (intégration PDA/téléphonie mobile/ordinateurs portables, etc.) et pour préfigurer les services réseau de demain en prenant en compte les contraintes des utilisateurs (et en premier lieu la sécurité).

2 Le déploiement d'IPv6 sur SYRHANO

2.1 Contraintes et échéancier

Vouloir déployer IPv6 sur le réseau régional est une chose, le faire en est une autre car les obstacles sont multiples :

- Pour la période 2000-été 2003, le réseau SYRHANO est opéré et supervisé par un prestataire qui ne nous permet pas un déploiement natif d'IPv6.
- IPv6 n'est pas supporté par tous les équipements, et les fonctionnalités disponibles ainsi que la compatibilité des équipements entre eux doivent être vérifiées.

Pour faciliter les choses, il est donc décidé dans un premier temps qu'une infrastructure logique v6 soit construite sur l'épine dorsale régionale v4 et qu'elle soit gérée par le CRIHAN de manière indépendante du service v4. En particulier, le CRIHAN commencera à déployer v6 sur le service de collecte xDSL qu'il exploite déjà en v4.

Dans un deuxième temps, l'appel d'offres « SYRHANO 2.1 » a été lancé et impose v6 aux soumissionnaires sur l'ensemble du réseau.

2.2 Préparations

Une fois prise la décision de déployer IPv6, force est de constater que des questions restent sans réponse et, pire, certaines questions ont plusieurs réponses parmi lesquelles on ne sait pas choisir...

2.2.1 Obtention d'un préfixe IPv6

SYRHANO est un des constituants du réseau français pour la recherche, et RENATER est son interlocuteur principal. C'est RENATER qui nous fournit les préfixes v4 et qui va nous fournir un préfixe v6 (/48), non sans nous demander de remplir plusieurs formulaires idoine mais un tantinet compliqués (cela s'est amélioré depuis !).

2.2.2 Plan d'adressage

La question du plan d'adressage peut sembler anecdotique, mais est révélatrice à la fois de la force de v6 et de son peu d'intérêt opérationnel dans l'immédiat. Une plage de 128 bits est disponible, ce qui paraît plus que nécessaire à court ou moyen terme ; pourtant, plusieurs options se présentent parmi lesquelles deux sont présentées ci-dessous :

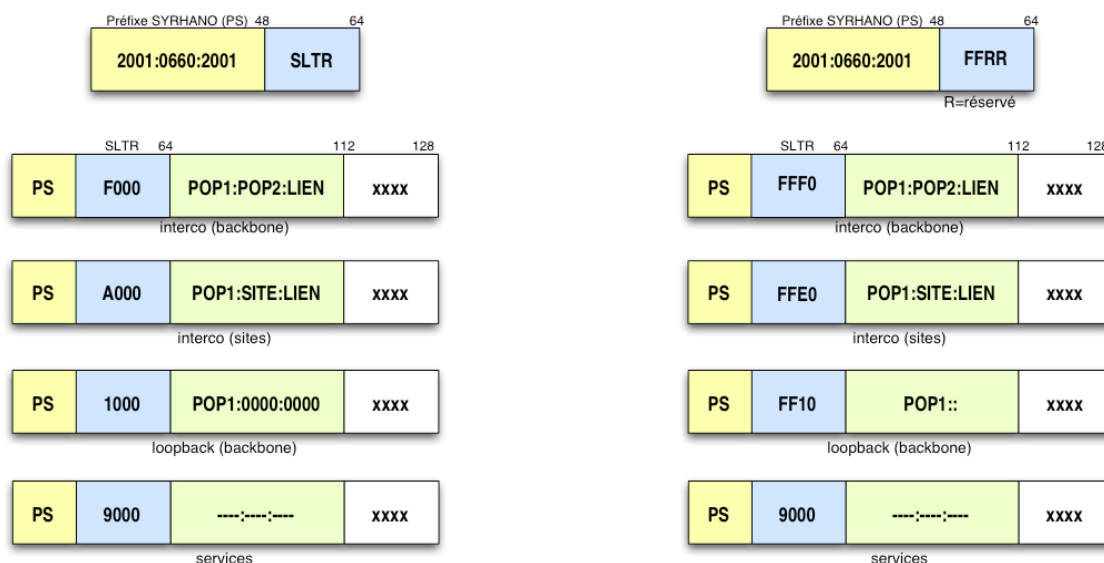


Figure 2 – Plans d'adressage pour SYRHANO (des séparations virtuelles sont positionnées à chaque frontière d'octet pour faciliter la représentation visuelle de l'espace d'adressage)

La première proposition répartit équitablement sur l'espace disponible les zones utilisées. La deuxième « économise » de plus grandes plages d'adresses. Après discussion avec plusieurs spécialistes IPv6 et quelques débats mémorables, il apparaît que les deux options sont légitimes et que peu importe l'option retenue. En fin de compte, personne ne sait encore ce que sera demain la norme (s'il y en a une) pour un déploiement massif de v6. Pour ce qui nous concerne, on raisonne encore avec les règles v4 en tête et nous avons du mal à nous projeter quelques années dans l'avenir. Il apparaît enfin que les préfixes vont également être ré-attribués, ce qui nous conforte dans l'idée que tout n'est pas figé et normalisé. Cependant, grâce aux mécanismes d'auto-configuration l'impact humain de la renumérotation devrait être minimum...

Il est donc décidé d'utiliser l'option 1 pour numéroté les équipements actifs de l'épine dorsale de SYRHANO. Une plage d'adresses est réservée pour les réseaux d'interconnexion avec les sites, comme cela est fait en v4 aujourd'hui. Une seconde plage est réservée pour de futurs services réseau, sans que nous puissions réellement les détailler aujourd'hui...

2.2.3 Matériels et logiciels

Les équipements réseau pour SYRHANO proviennent essentiellement de la gamme Cisco, avec l'exception d'un Juniper M5 pour la collecte ADSL.

Des équipements 6WIND sont également acquis pour servir de concentration et de routeur d'accès pour des futurs sites utilisateurs. Ces équipements « double pile » par défaut nous permettent d'élargir nos connaissances des implémentations v6 et de vérifier l'interopérabilité des logiciels avec nos routeurs existants.

2.3 Mise en place d'un point de peering v6 régional

Comme il a été dit précédemment, seul le transport d'IPv4 est proposé nativement sur l'épine dorsale du réseau SYRHANO. Un routeur de peering v6 géré par le CRIHAN est donc installé sur l'épine dorsale de SYRHANO ; il est connecté en IPv6 natif sur RENATER (PVC ATM) depuis janvier 2003. Les sites directement raccordés sur SYRHANO et souhaitant expérimenter un service v6 sont également connectés sur ce routeur (tunnel 6in4 pour l'Université du Havre et le CORIA, interconnexion IPv6 native pour le CRIHAN). Chacune de ces connexions nécessite pour les sites d'obtenir un préfixe v6 auprès de RENATER

Afin d'élargir le périmètre v6, nous proposons de maquetter le déploiement de v6 sur la plate-forme de collecte xDSL sur laquelle est raccordé un grand nombre d'utilisateurs...

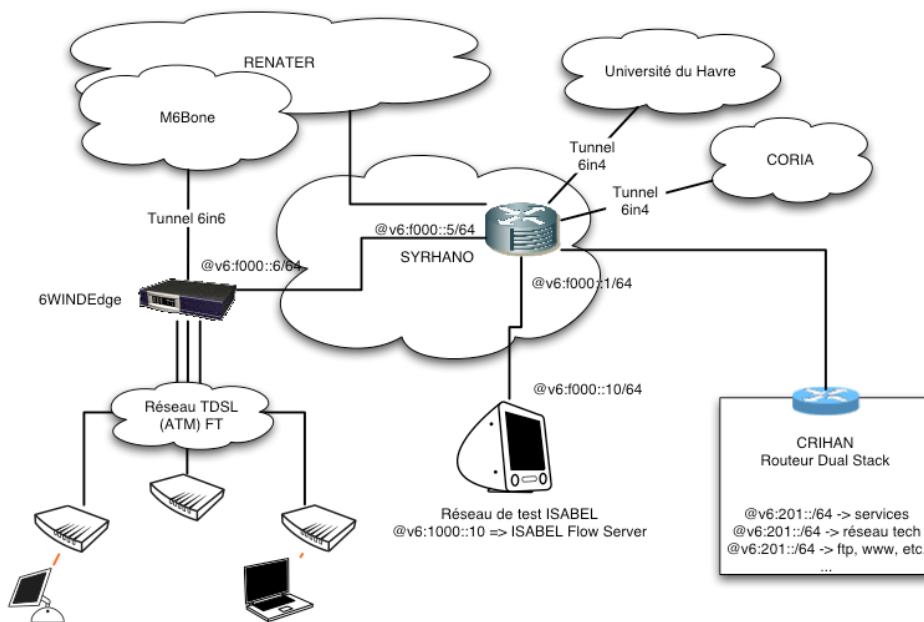


Figure 3 – Le réseau régional v6 (mai 2003) en attendant le passage à v6 natif

2.4 Collecte v6 sur xDSL pour les établissements scolaires

2.4.1 Une communauté de sites, des besoins communs

La région Haute-Normandie compte environ trois cents établissements scolaires du second degré. La plupart ont été raccordés dès 1995-96 sur SYRHANO/RENATER par le CRIHAN via RNIS ; quelques uns le sont via satellite ou boucle locale radio. Depuis 2001, un service de collecte xDSL a été mis en place par le CRIHAN et le Rectorat de Rouen ; la migration de RNIS à xDSL s'opère depuis en fonction de l'éligibilité technique des sites.

Les établissements scolaires du second degré partagent des comportements et des besoins communs liés à leur fonctionnement administratif et leurs objectifs pédagogiques. Or, aujourd'hui, ces besoins ont du mal à être satisfaits à cause de certaines limitations du protocole IPv4 (malgré l'offre « sur mesure » faite par le CRIHAN et le Rectorat). Le protocole IPv6 est une solution tout à fait crédible pour répondre à leurs demandes et les nouvelles possibilités offertes par la connectivité de bout en bout feront également naître de nouveaux besoins.

Les lycées et collèges ont régulièrement besoin de faire des « remontées » d'informations sécurisées vers le Rectorat via des tunnels VPN IPSec. Seule une connectivité de bout en bout permet d'envisager une utilisation aisée et généralisée de ces techniques de sécurité. La connectivité globale et l'augmentation conséquente des débits sur le réseau SYRHANO permettent également d'envisager la généralisation de la visioconférence et de la téléphonie. Dans l'avenir, les fonctionnalités dites de « mobilité » offertes par IPv6 pourront également être déployées dans les établissements et sur SYRHANO/RENATER.

2.4.2 Architecture IPv4 de départ

La concentration des flux IPv4 provenant des établissements scolaires se fait sur un routeur Juniper M5 sur lequel remontent tous les PVC ATM provenant des sites connectés.

La plupart des sites disposent d'un routeur d'accès Cisco 827, et il n'est pas envisagé de les changer. Cependant, même si les routeurs Cisco 827 supportent IPv6, il est, dans certains cas, nécessaire d'augmenter leur mémoire vive pour qu'ils puissent supporter sans broncher l'image IOS intégrant IPv6.

Les sites disposent de deux réseaux « NATés » : un réseau pédagogique et un réseau administratif.

2.4.3 Le déploiement d'IPv6

Trois étapes sont prévues. Les deux premières doivent permettre la validation globale de la plate-forme de collecte v6 avant de passer à la dernière qui consiste en un déploiement général de v6.

2.4.3.1 Première étape

La première étape du déploiement consiste en la simple adjonction d'un routeur de concentration 6WindEdge à la solution de collecte xDSL v4. Deux sites pilotes y sont raccordés. Le routeur a tout d'abord été relié au monde v6 à l'aide d'un tunnel 6in4 sur le 6Bone, puis sur le service v6 de RENATER quand il a été disponible, via le Cisco 7206 (peering v6) installé sur SYRHANO.

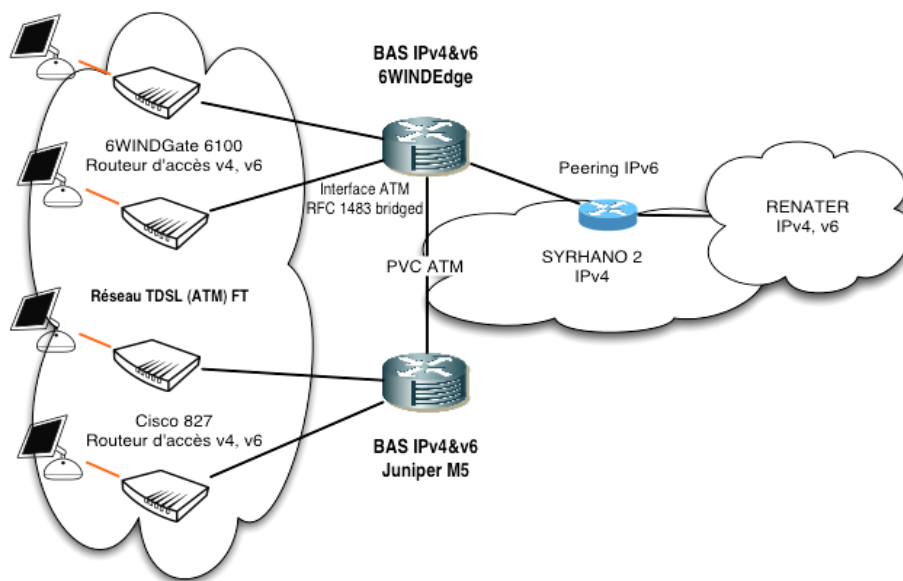


Figure 4 – Première étape : maquette pour un service de collecte IPv6 sur ADSL pour SYRHANO

2.4.3.2 Deuxième étape

La deuxième étape consiste à activer IPv6 sur les routeurs d'accès Cisco 827 des sites pilotes. Le fonctionnement du réseau IPv4 du site n'est pas modifié et l'utilisation du protocole IPv6 pour les communications reste transparente. Cette architecture permet de commencer à familiariser les différents acteurs avec le nouveau protocole et de commencer à migrer

stations et serveurs (double pile IP). En généralisant (banalisant) ainsi v6, les sites peuvent utiliser les nouvelles fonctionnalités offertes par IPv6 tout en gardant une compatibilité vis-à-vis des réseaux v4.

Ce déploiement n'est pas trivial. D'un point de vue technique, il s'agit de faire coexister deux réseaux logiques sur une même infrastructure physique. Cela entraîne des problèmes d'exploitation et de supervision du réseau, y compris le suivi des problèmes de sécurité. Pour ces raisons, cette infrastructure ne peut être que provisoire.

Il est difficile de maintenir une infrastructure qui ne propose pas de services applicatifs, même dans le cadre d'une expérimentation. Des services sont donc migrés sur v6, comme certains serveurs DNS, web et un serveur de messagerie électronique. Cela ne pose pas de problème particulier sous Linux. Pour ce qui concerne les clients, c'est un peu plus délicat, et savoir si la connexion se fait en v4 ou v6 n'est pas toujours chose aisée.

La société 6WIND nous propose de tester l'applicatif de visioconférence ISABEL (, développé au DIT-UPM de Madrid et commercialisé par la société AGORA (<http://isabel.dit.upm.es/>). Fonctionnant sous Linux et ne nécessitant qu'une webcam, l'installation en est relativement aisée car « packagée » avec une distribution Linux Suse. Plusieurs sites sont équipés de postes ISABEL (6WIND, RENATER Paris, Université de Caen, Université du Havre, CRIHAN). Le poste du CRIHAN a servi de pont (Flow Server).

L'intérêt d'ISABEL est de fonctionner en v4 et en v6. On a ainsi pu tester une visioconférence multipoints avec des postes v4 et des postes v6. Le gros point noir est que le poste de visioconférence est dédié car il nécessite un processeur puissant ; de plus, la configuration matérielle est relativement figée.

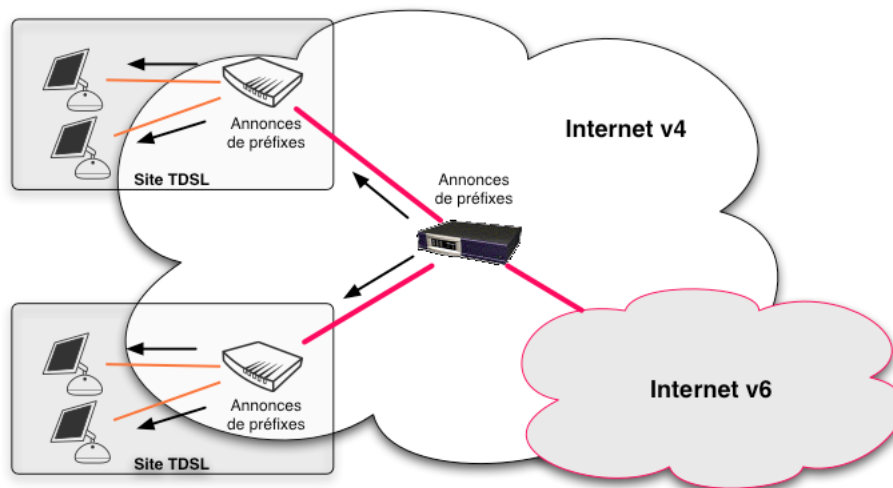


Figure 5 – Deuxième étape : sites TDSL IPv4 et IPv6 accédant à l'Internet v6 via un routeur 6WindEdge

2.4.3.3 Troisième étape

La troisième étape consiste à généraliser le déploiement d'IPv6. Les sites fonctionnent alors en IPv6 natif et accèdent à l'Internet v4 grâce à des mécanismes de migration configurés sur le routeur d'accès (NAT-PT ou DSTM). Dans cette configuration, l'accès à l'Internet v4 est considéré comme devant se réduire au fil du temps.

Cette troisième étape du déploiement n'a pas encore démarré et seule une maquette « sur table » a été réalisée : le réseau SYRHANO « 2.1 », en fonctionnement depuis la fin de l'été 2003, doit permettre le transport natif d'IPv6, mais la date de mise en production de v6 dépend de la disponibilité de versions logicielles compatibles avec les services MPLS⁶ déjà déployés sur l'infrastructure régionale.

⁶ MPLS et IPv6 ne cohabitent pas encore sur le Cisco Catalyst 6509 qui constitue le nœud SYRHANO de Saint-Etienne du Rouvray. Une version qui intègre les deux fonctionnalités devrait être disponible en fin d'année. MPLS est en particulier utilisé pour remonter sur le nœud de Saint-Etienne du Rouvray les PVC des sites connectés sur la porte TDSL d'Evreux (AToM).

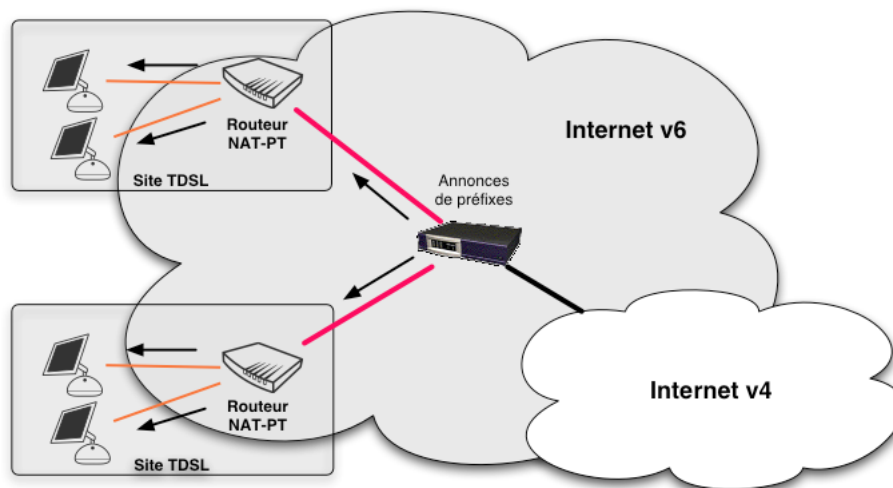


Figure 6 – Troisième étape : l'Internet v4 est devenu marginal, les sites sont uniquement v6 et accèdent aux réseaux v4 en mettant en œuvre une technique de migration

2.4.3.4 Les mécanismes de transition envisagés

Les techniques de transitions à mettre en œuvre pour la phase 3 sont testées sur table avant leur déploiement. Le choix s'oriente vers NAT-PT ou DSTM.

NAT-PT (Network Address Translation – Protocol Translation) est similaire au NAT v4 mais assure en plus la conversion du protocole IP utilisé. Les sites en v6 natif n'ont bien sûr pas de problème pour accéder à l'Internet v6. Pour accéder à l'Internet v4 au travers de NAT-PT, la machine v6 qui initie une connexion avec une machine v4 envoie un paquet v6 vers le routeur NAT-PT avec comme adresse de destination, l'adresse IPv4 mappée de la machine destination et comme adresse source son adresse v6. Le routeur NAT-PT va traiter ce paquet, lui affecter une adresse v4 de son pool et forger un nouveau paquet IPv4 avec comme adresse source l'adresse v4 récemment attribuée et comme adresse destination l'adresse de la machine distante.

Lorsque la machine v4 répond, le routeur NAT-PT exécute l'opération inverse et translate le paquet v4 reçu en un paquet v6 conformément aux paramètres stockés dans son cache. NAT-PT semble être un mécanisme de transition simple à mettre en œuvre. Les machines situées derrière NAT-PT peuvent être pleinement v6 et n'ont besoin de la translation que pour accéder à des réseaux v4. Malheureusement, NAT-PT souffre des mêmes limitations que le NAT IPv4.

DSTM (Dual Stack Transition Mechanism) alloue dynamiquement des adresses v4 à la demande et encapsule les paquets v4 dans des paquets IPv6. DSTM semble plus difficile à déployer et à maintenir et impose que toutes les machines utilisant potentiellement v4 implémentent la pile de protocole IPv4. En revanche, la connexion entre les mondes v4 et v6 est établie de bout en bout.

3 Conclusion

Déployer IPv6 peut (doit ?) permettre une renaissance des valeurs fondatrices de l'Internet. Ce n'est pas seulement une question de nombre d'adresses IP disponibles : c'est l'occasion de se poser la question de savoir comment déployer des services nouveaux et de faire évoluer la technologie pour que chacun puisse se l'approprier avec le minimum de contraintes.

Les réseaux IP sont parfois aujourd'hui de vraies usines à gaz à la limite du raisonnable, leur exploitation est très difficile, alors même que les services proposés aux utilisateurs sont pauvres et peu nombreux. Le caractère global d'IPv6 signifie aussi que toutes les machines de l'Internet seront potentiellement joignables (serveurs) et que les techniques de sécurisation des services devront évoluer pour devenir, d'une manière ou d'une autre, plus souples et faciles à mettre en œuvre, plus efficaces et moins gourmandes en main d'œuvre⁷.

⁷ Il est vrai qu'on disait cela aussi pour v4 il y a quelques années...

Pourtant IPv6 ne semble pas encore la priorité pour certains équipementiers, ni celle des ingénieurs réseaux, trop occupés à essayer de stabiliser leurs réseaux v4 en croissance souvent rapide.

Or les conséquences du déploiement d'IPv6 aujourd'hui sont principalement humaines car cela implique la construction d'une infrastructure logique IP supplémentaire et donc deux technologies réseau à configurer, maintenir, sécuriser, superviser et potentiellement deux fois plus de failles de sécurité et de sources de problèmes.

Pourtant, il nous paraît nécessaire de rapidement mettre en œuvre v6, pour acquérir un savoir-faire et se confronter aux problèmes de manière à réfléchir le plus sereinement possible aux solutions à y apporter. La tâche n'est cependant pas aisée, pour des raisons aussi diverses que les contraintes imposées par certains exploitants de réseau, les mises à jour requises pour certains équipements et l'indisponibilité ou l'incompatibilité de versions logicielles pour les routeurs.

Les techniques de migration intégrées dans la suite de protocoles v6 permettent aujourd'hui de déployer v6 par défaut et sans que l'utilisateur final ne s'en aperçoive, pour peu que les services applicatifs qui constituent son environnement de travail soient également accessibles. C'est en généralisant ainsi l'usage de v6 puis en activant des fonctionnalités innovantes (typiquement la mobilité, qui permettra entre autres une intégration aisée des ordinateurs portables, PDA et téléphones) que chacun prendra conscience que la page v4 est presque tournée.

Références

- [1] Gisèle Cizault. *IPv6 Théorie et pratique*, Mars 2002
- [2] Silvia Hagen. *IPv6 Essentials*, Juillet 2002
- [3] Christian Schild, Tina Strauf. *Initial IPv4 to IPv6 Transition Cookbook for End Sites Networks/Universities*, (<http://www.6net.org/publications/deliverables/D2.2.2.pdf>), Février 2003
- [4] Tim Crown, Ming Feng. *Initial IPv4 to IPv6 Migration Cookbook for Organisational/ISP (NREN) and Backbone Networks*, (<http://www.6net.org/publications/deliverables/D2.3.2.pdf>), Mars 2003
- [5] Christian Huitena. *IPv6 the new Internet Protocol*, 1997
- [6] Site web du G6. <http://www.g6.asso.fr>
- [7] Site web du 6bone. <http://www.6bone.net>
- [8] Site web du Forum IPv6. <http://www.ipv6forum.com/>
- [9] Site web de JOIN. <http://www.join.uni-muenster.de/?lang=en>
- [10] Site web du CRIHAN et de SYRHANO. <http://www.crihan.fr>