

---

# Le Support des Réseaux Mobiles dans IPv6

**Thierry Ernst**

*WIDE Project, Jun Murai Lab, Keio University  
Graduate school of Media and Governance  
Faculty of Environmental Information  
5322 Endo, Fujisawa  
Kanagawa 252-8520 Japan  
ernst@sfc.wide.ad.jp*

---

*RÉSUMÉ. Dans cet article, nous étudions de nouveaux aspects de la mobilité dans IPv6. Les travaux traditionnels dans ce domaine se préoccupent de fournir une connectivité permanente pour les stations mobiles. En revanche, l'objet de cet article est de traiter le cas des réseaux mobiles, réseaux ayant pour particularité d'être connectés à l'Internet via un ou plusieurs routeurs qui changent leurs points d'ancrage dans la topologie. Leur support vise à permettre le déplacement en temps réel de pans entiers de l'Internet, tout en maintenant les sessions ouvertes. Quelques unes des applications potentielles sont les réseaux d'accès déployés dans les transports publics pour les passagers, les réseaux de capteurs embarqués dans les véhicules et les réseaux personnels (Personal Area Networks), qui exigent tous une connexion permanente et ininterrompue à Internet. Les protocoles définis par l'IETF pour le support des stations mobiles, notamment Mobile IPv6, ne permettent pas de supporter efficacement les réseaux mobiles qui ont une problématique spécifique. Nous avons donc proposé un certain nombre d'extensions à Mobile IPv6, notamment une approche faisant usage des technologies multipoint et nous avons contribué à la création de NEMO, un nouveau groupe à l'IETF en charge de standardiser une solution pour le support de la mobilité des réseaux.*

*ABSTRACT. Traditional work turning around mobility support has usually focused on host mobility while the purpose of this paper is to study issues related to network mobility in IPv6, i.e. entire IPv6 networks that change their point of attachment to the Internet topology such as Personal Area Networks (PANs), access networks deployed in public transportation (trains, buses, aircrafts), and networks of sensors installed in vehicles (trucks, cars). Changing the point of attachment results in broken sessions. Protocols such as Mobile IPv6 designed to support host mobility are either inappropriate or inefficient to support network mobility. We have therefore proposed extensions to Mobile IPv6 and created the NEMO working group at the IETF to deal with mobile networks specifically.*

*MOTS-CLÉS : Mobilité des Réseaux, Réseaux Mobiles, Réseaux Embarqués, Support de la mobilité, NEMO, IPv6, Mobile IPv6*

*KEYWORDS: Network Mobility, NEMO, IPv6, Mobile IPv6*

---

## 1. Introduction

Les travaux dans le domaine de la mobilité dans IPv6 [DEE 98] se sont jusqu'à présent consacrés au support des *stations mobiles*, c'est-à-dire des stations changeant de point d'ancrage dans la topologie Internet. Le but principalement recherché est alors la fourniture d'une connectivité Internet permanente, sans que les communications en cours ne soient interrompues suite à ce changement. Or, il est possible qu'un réseau tout entier en fasse autant. Il s'agit alors d'un *réseau mobile*, défini comme un ensemble de sous-réseaux connectés à l'Internet par l'intermédiaire d'un ou plusieurs routeurs qui changent leurs points d'ancrage. Les réseaux déployés dans les véhicules en donnent un bon exemple. Malgré le besoin de fournir un accès Internet permanent à toutes les stations localisées dans un réseau mobile, suscité soit par les fabricants de véhicules, soit par les compagnies de transport, soit par les usagers eux-mêmes, des travaux se préoccupant des problèmes spécifiques liés au déplacement des réseaux n'ont réellement vu le jour que récemment. Nous nous proposons donc d'étudier le support de la mobilité des réseaux. Notre but est de faire le tour de nos contributions, de faire avancer la réflexion dans ce sujet et de dresser l'état d'avancement des travaux à l'IETF. Dans un premier temps, nous présentons les applications envisagées et leurs besoins, puis la terminologie nécessaire à la compréhension de ce sujet. Vient ensuite une présentation succincte du problème posé par la mobilité dans la couche IP. L'étude des solutions permettant de supporter la mobilité des stations nous suggère d'analyser la capacité de Mobile IPv6 à supporter les réseaux mobiles, et nous montrons que ce protocole est inadapté. Nous présentons ensuite nos propositions d'extension puis le groupe de travail NEMO spécifiquement créé à l'IETF.

## 2. Les applications et les besoins

Les applications possibles des réseaux mobiles sont nombreuses et très variées. Elles incluent entre autres les réseaux de capteurs déployés dans les véhicules (avions, trains, bateaux, voitures) qui ont besoin d'interagir avec des serveurs dans Internet, par exemple pour assurer la transmission de données nécessaires à la navigation, les réseaux d'accès déployés dans les transports publics (en particulier bus, trains et taxis) offrant une borne d'accès Internet aux passagers, ou encore les réseaux personnels (Personal Area Networks) constitués par l'ensemble des appareils électroniques de petite taille (montres, téléphones cellulaires, agendas électroniques et autres assistants personnels, appareils photo numériques...) portés par les personnes. L'exemple le plus typique est un véhicule qui fournit un accès Internet par le biais de plusieurs technologies sans fil (cellulaire, IEEE 802.11b, Bluetooth et satellite). Celui-ci change fréquemment de point d'ancrage dans la topologie Internet, non seulement à cause de sa vitesse de déplacement, mais aussi à cause de la variété des technologies d'accès qui lui seront probablement offertes, en fonction de la densité de la circulation et de la densité d'urbanisation, du pays, etc. Ce scénario est mis en oeuvre sur la plateforme de démonstration du projet InternetCAR [url02a, UEH 98, ERN 02b, ERN 03c] conduit au sein de notre organisation WIDE (Widely Interconnected Distributed Environment), à

Keio University près de Tokyo. Le réseau mobile déployé dans le véhicule est constitué de trois sous-réseaux isolés l'un de l'autre. L'un est utilisé pour transmettre les données de contrôle des organes primaires du véhicule (moteur, freins, pression des pneumatiques, et divers capteurs); l'autre pour contrôler les organes moins importants (l'ouverture des portes, des fenêtres), et le troisième pour la transmission des données multimédia. Les travaux de ce projet sont à présent repris par les projets InternetITS et Nautilus plus ambitieux, toujours au sein de WIDE. InternetITS [url02b] (ITS : Intelligent Transportation Systems) est un projet de grande envergure visant à réaliser les applications recherchées par l'industrie automobile et traitant notamment de la question des communications entre le véhicule et Internet, notamment les réseaux embarqués. Nautilus [url03] est un autre projet, plus récemment créé, ayant pour but la réalisation de la mobilité dans IPv6, qui passe par le déploiement de la mobilité des stations et des réseaux, et qui se servira de véhicules comme plateforme de démonstration et de développement.

Un autre exemple tout aussi démonstratif est celui d'une compagnie de transport ferroviaire ou aérienne offrant un accès Internet permanent et ininterrompu à ses passagers. Cet accès pourrait non seulement permettre aux passagers de se connecter sur un site distant, télécharger de la musique et de la vidéo depuis n'importe quel fournisseur de service, ou de surfer sur la toile sans interruption de service en utilisant les appareils proposés par la compagnie, mais aussi de s'y connecter en utilisant leur propre ordinateur portable ou téléphone<sup>1</sup>. Deux expériences de ce type ont déjà été conduites en 2002 par deux compagnies ferroviaires distinctes de la banlieue de Tokyo. La compagnie JR permettait, à bon escient pendant la durée de la réunion de l'IETF, aux passagers de première classe de connecter leur ordinateur portable à Internet via une connexion IEEE 802.11b sur un routeur dans le premier wagon. Dans l'expérience, ce routeur était connecté à l'Internet au niveau deux via une connexion IEEE 802.11b lors des arrêts en gare, et via le réseau cellulaire pendant les déplacements. La deuxième expérience, conduite par Nokia en collaboration avec la compagnie Odakyu Line était plus modeste, et avait pour but de connecter un routeur à Internet au niveau 3, et de tester les changements d'interface entre IEEE 802.11b lors des arrêts en terminus, et le réseau cellulaire pendant les déplacements [url02d]. Cette expérience utilisait les technologies développées à Keio University.

Dans le cas spécifique de l'aviation, outre son utilisation par les passagers, l'Internet peut aussi servir à échanger les données destinées à la navigation entre l'avion et les tours de contrôle aérien. Ce scénario a justement fait l'objet de recherches de la part d'Eurocontrol (une organisation européenne pour la sécurité de la navigation aérienne) [QUI 98]. Le cas de l'avion est particulier, car celui-ci change probablement rarement de point d'ancrage. Au cours d'un vol international, l'avion est certainement connecté via un satellite géostationnaire au-dessus des océans, et via un lien radio au-dessus des terres.

---

1. Ce scénario est d'ailleurs mentionné depuis longtemps dans [TAN 96], [PAR 94], section 5.15; sections 1.2.4 et 5.5.8; [PER 98], section 5.12; [SOL 98], section 11.2; et [PER 96] section 4.5)

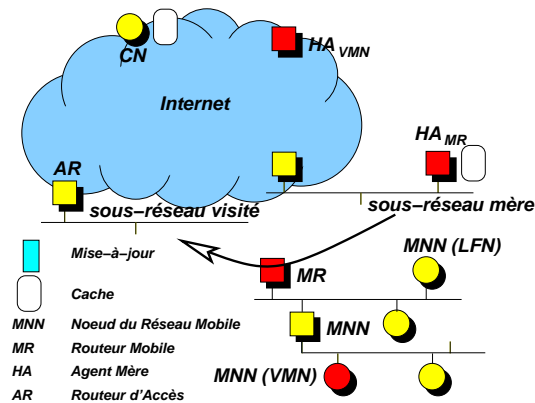
Tous les scénarii présentés ci-dessus, notamment celui du train, justifient qu'un réseau mobile puisse être de taille relativement grande (de l'ordre de plusieurs centaines de machines inter-connectées par plusieurs routeurs et sous-réseaux) et communiquant avec un nombre important de correspondants. Au vu de celui de l'automobile (voir [ERN 02b]), le véhicule peut être amené à se déplacer sur de longues distances et donc à prendre ancrage à l'Internet via des points très éloignés dans la topologie. Il est ainsi raisonnable de considérer le cas où les réseaux mobiles non seulement changent de sous-réseau d'attache, mais certainement aussi de fournisseurs de service ou de domaine administratif (mobilité globale). Dans un tel cas, en plus des problèmes de contrôle d'accès et de sécurité, nous observons que les réseaux mobiles peuvent être amenés à se connecter à Internet par le biais de technologies hétérogènes, ce qui nécessite de considérer les aspects de changement d'interface et aussi de multi-domiciliation. D'autre part, ces scénarii montrent que nous devons faire face à deux niveaux de mobilité, celle des réseaux eux-mêmes, et celle des stations, puisque les ordinateurs, téléphones portables et autres moyens techniques portés par les passagers sont des stations mobiles, voire des réseaux personnels, qui peuvent prendre un ancrage temporaire dans le réseau mobile visité (mobilité enchaînée).

### 3. Internet et la Mobilité

Dans cette section, nous présentons brièvement l'organisation de l'Internet et certains termes extraits d'une terminologie spécifiquement adaptée aux réseaux mobiles que nous avons définie dans [ERN 01a] puis soumise à l'IETF [ERN 03b]. Le lecteur peut aussi se reporter à [MAN 03] qui offre une terminologie relativement complète.

– **Organisation de l'Internet et Adressage** : l'Internet est une agglomération de réseaux partitionnés en plusieurs domaines. Un domaine représente d'ordinaire un campus, une entreprise, un fournisseur de service. Un domaine peut lui-même être divisé en sites. L'ensemble des noeuds se trouvant sur le même lien logique constitue un *sous-réseau*. Les noeuds sont de deux types. Ceux qui relient un sous-réseau à un autre sont des *routeurs*, les autres de simples *stations*. A chaque sous-réseau, correspond un préfixe qui permet d'identifier la position du sous-réseau dans la hiérarchie de l'Internet. Un *réseau* est donc un ensemble de sous-réseaux partageant le même préfixe IP et connectés à l'Internet par le biais d'un ou plusieurs routeurs externes. Tous les noeuds ayant une interface sur un sous-réseau donné ont donc une adresse IP correspondant au préfixe de ce sous-réseau. Cette adresse identifie à la fois la position topologique du noeud, et le noeud lui-même. L'adresse IP est donc intrinsèquement liée à la position du noeud.

– **Noeud Mobile** : un *noeud mobile* (MN) est un noeud individuel qui change son point d'attachement dans la topologie Internet, c'est-à-dire qui se déplace d'un sous-réseau à un autre. Dans le cas des stations, nous parlerons de *station mobile*, dans le cas de routeur, de *routeur mobile*. Les routeurs d'accès (ARs) sont les routeurs qui desservissent les liens où il est permis aux stations mobiles et routeur mobiles de prendre ancrage. Le point d'attachement initial dans le réseau mère est appelé le *sous-*



**Figure 1.** Terminologie pour les Réseaux Mobiles

*réseau mère* tandis que chaque point d'attache successif est appelé *sous-réseau visité*.

– **Réseau Mobile** : un *réseau mobile* est un réseau dont le ou les routeurs externes changent dynamiquement leur point d'ancrage à l'Internet. Ils sont connectés à l'Internet par le biais d'un ou plusieurs *routeurs mobiles* (MRs). Les interfaces d'un MR connectées sur le sous-réseau mère ou le sous-réseau visité seront dites *interfaces externes* tandis que toutes les autres interfaces seront nommées *interfaces internes*. Les réseaux mobiles ne doivent pas être confondus avec les réseaux *ad-hoc* qui sont des réseaux sans infrastructure et dont l'ensemble des nœuds sont des routeurs mobiles, avec ou sans sous-réseau attaché à leur interface interne.

– **Nœuds du Réseau Mobile** : le terme générique MNN (Mobile Network Node) désigne tout nœud localisé à l'intérieur du réseau mobile. Parmi les MNNs, il convient de différencier une station fixe résidant de manière permanente dans le réseau mobile (*station fixe locale* ou LFN), d'une station mobile appartenant au *réseau mobile* (*station mobile locale* ou LMN), et d'une station mobile n'appartenant pas au réseau mobile mais s'y attachant (*station mobile étrangère* ou VMN). Tout nœud communiquant avec un ou plusieurs MNNs est considéré un nœud correspondant (CN) du réseau mobile. Ceci est illustré sur la figure 1 qui montre un réseau mobile se déplaçant de son réseau mère vers un autre.

– **Mobilité Enchaînée** : la *mobilité enchaînée* (ou *imbriquée*) est un nouveau type de configuration rendue possible grâce à la mobilité des réseaux. Dans le cas d'une station mobile nous faisons face à une double mobilité, celle du réseau mobile, et celle du VMN qui prend ancrage dans le réseau mobile. Dans le cas d'un routeur mobile faisant lui-même office de passerelle à un réseau mobile qui à son tour permet l'ancrage d'un VMN (station ou routeur), nous avons trois niveaux de mobilité. La mobilité des réseaux rend en principe possible un nombre indéfini de niveaux de mobilité. Deux niveaux de mobilité sont illustrés sur la figure 1. Le réseau mobile y accueille une station mobile (VMN) issue d'un autre sous-réseau (identifié par HAvmn).

#### 4. La Problématique de la Mobilité Appliquée aux Réseaux Mobiles

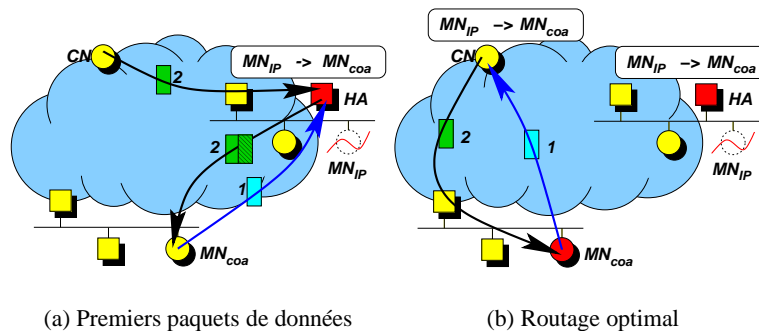
– **Cas général** : nous avons vu dans la section précédente que l'adresse IP identifie à la fois la position topologique d'un noeud et le noeud lui-même<sup>2</sup>. Le problème posé par la mobilité vient en fait essentiellement du modèle d'adressage de TCP/IP qui confond le rôle d'identifiant d'interface de l'adresse IP, et son rôle d'identifiant de la localisation dans la topologie Internet qui est hiérarchisée. Si un noeud change d'emplacement, l'adresse IP qui identifie l'interface qui change d'emplacement doit changer. Le changement d'adresse a pour conséquence de couper les sessions ouvertes qui se servent de l'adresse IP comme identificateur tandis que le changement d'emplacement nécessite un re-routage. Le support de la mobilité a donc pour but, d'une part de définir un mécanisme permettant de *maintenir les sessions ouvertes* lors des déplacements, et d'autre part de *déterminer la nouvelle position du noeud dans la topologie* (localisation et routage). Ceci se fait généralement au prix de messages de signalisation. Pour de plus amples détails, nous recommandons au lecteur la large littérature qui existe dans ce sujet, ou de se référer à nos travaux ([ERN 01a], chapitre 2).

– **Cas spécifique des réseaux mobiles** : que ce soit un noeud qui se déplace ou tout un réseau, le problème est similaire. Dans le cas spécifique des réseaux mobiles, seul le (ou les) MR est tenu de changer l'adresse de son interface externe. La structure interne d'un réseau mobile est préservée lors des déplacements du MR. Son déplacement ne causant pas de changement du point d'ancrage physique des MNNs, ceux-ci ne sont pas tenus de changer d'adresse. Mais comme tous les paquets transmis entre MNNs et CNs transitent nécessairement par un MR, ceux-ci peuvent sembler mobiles du point de vue des CNs. A la problématique habituelle de la mobilité s'en ajoute d'autres propres aux réseaux mobiles. Tout d'abord, le changement de point d'ancrage d'un seul noeud auquel sont attachés d'autres noeuds doit être géré pour un ensemble de noeuds, et si possible de manière transparente pour ces derniers pour ne pas nécessiter de fonctionnalités nouvelles dans l'ensemble des implémentations IPv6. D'autre part, la mobilité imbriquée permet d'imaginer tout un ensemble de configurations. Dans chacune de ces configurations se pose la question d'un routage dit *triangulaire* qu'il faut optimiser. Enfin, nous avons parlé de mobilité globale, qui est exacerbée par les applications et configurations possibles des réseaux mobiles. Dans un tel cas, la sécurisation des données de contrôle, le contrôle d'accès aux ressources du réseau visité, et la possibilité de se connecter par l'intermédiaire de plusieurs routeurs mobiles disposant au total de plusieurs interfaces externes (réseau multi-domicilié) posent des questions cruciales.

– **Les approches potentielles** : la mobilité des réseaux et des stations présentant de grandes similitudes, il nous a semblé logique de procéder à une étude poussée des solutions permettant la mobilité des stations. Cette étude, dont les résultats sont développés dans [ERN 01a] (chapitre 3), montre qu'un identifiant permanent ne dépendant pas de la position du mobile dans la topologie Internet est généralement (mais pas systématiquement) préconisé. La classification des solutions dans une taxinomie (cha-

---

2. En fait, l'adresse IP identifie l'interface d'un noeud, mais pour simplifier nous nous contentons souvent de dire que l'adresse identifie le noeud



**Figure 2.** *Mobilité des Stations avec Mobile IPv6*

pitre 4) montre que ce problème d'adressage peut être résolu de plusieurs manières. Le moyen le plus répandu fait usage de deux adresses, l'une utilisée en tant qu'identifiant d'interface, et l'autre en tant qu'identifiant de la position dans la topologie. C'est aussi l'approche qui nous semble la plus évidente et la plus simple car elle ne remet pas en cause la pérennité des différents protocoles de la couche réseau et ne nécessite donc pas d'importantes modifications. D'autre part, afin de limiter la signalisation nécessaire à la gestion de la mobilité et de permettre le passage à l'échelle, il est souvent utile de différencier la *mobilité locale* (entre sous-réseaux topologiquement proches dans la topologie Internet) de la *mobilité globale* (entre sous-réseaux topologiquement éloignés dans la topologie Internet). Une approche hiérarchique peut alors être utilisée en combinant deux classes de solution, notamment le double adressage avec l'usage de protocoles de routage unipoint, ou l'usage d'arbre de distribution multipoint.

## 5. Analyse de Mobile IP pour le support des Réseaux Mobiles

Parmi l'ensemble des solutions inventoriées lors de notre étude du support de la mobilité des stations, seul Mobile IP, dans sa version IPv4 [PER 96], mentionne, brièvement, les réseaux mobiles, en prétendant que la mobilité des réseaux peut être gérée de la même manière que celle des stations. Comme Mobile IP est aussi la solution standard de l'IETF dans IPv6 [JOH 03], il nous semble que la capacité de ce protocole à supporter efficacement les réseaux mobiles doit être évalué en priorité. Nous allons donc détailler les raisons pour lesquelles Mobile IPv6 n'est pas adapté au support de la mobilité des réseaux, en commençant par résumer son fonctionnement.

### 5.1. Mobile IPv6 et les Stations Mobiles

Mobile IPv6 gère le problème de la mobilité en allouant deux adresses à chaque station mobile MN. La première ( $MN_{ip}$ ) est une adresse permanente qui identifie

la station dans le sous-réseau mère. La seconde ( $MN_{coa}$ ) est temporaire (careof address) et est obtenue dans le sous-réseau visité sur lequel le mobile prend ancrage. Une relation est établie entre les deux adresses, ce qui permet d'utiliser la première comme identificateur, et la deuxième pour le routage. Le MN peut posséder simultanément plusieurs adresses  $MN_{coa}$  sur des liens différents, mais il n'en enregistre qu'une seule, appelée l'adresse temporaire primaire. Le mobile fait ensuite parvenir l'adresse temporaire primaire  $MN_{coa}$  au moyen d'un message de mise-à-jour (BU), non seulement à son *agent mère* (HA), mais aussi à chacun de ses correspondants CNS. Les BUs IPv6 sont des paquets spéciaux contenant deux extensions d'entête IPv6 supplémentaires. L'adresse permanente du mobile permettant son identification est contenue dans l'option *Home Address Option* de l'entête d'extension *Destination Option*. Le message de mise-à-jour instruisant le destinataire d'ajouter ou de mettre à jour l'entrée correspondante dans son cache (*Binding Cache*) est contenu dans l'entête d'extension *Mobility Header*. Lorsque le récepteur obtient un BU valide (i.e. obéissant aux tests de conformité liés à la sécurité, particulièrement l'authentification de l'émetteur par son destinataire), une nouvelle entrée est ajoutée dans son cache et les paquets suivants peuvent être envoyés vers la destination effective du mobile.

Au début d'une communication entre un correspondant et un mobile, le correspondant n'a pas connaissance de l'adresse temporaire  $MN_{coa}$ . Il envoie donc les paquets normalement vers l'adresse  $MN_{ip}$  du mobile. Ces paquets sont donc routés jusqu'au sous-réseau ayant le même préfixe que l'adresse de destination et parviennent donc sur le sous-réseau mère du mobile. Le paquet y est intercepté par le HA puis encapsulé vers  $MN_{coa}$  comme cela est montré sur la figure 2a. A la réception d'un paquet encapsulé, le mobile le décapsule, ajoute le correspondant dans sa liste de correspondants et envoie un BU à celui-ci (figure 2b). Le correspondant comprend qu'il communique avec un mobile ; il enregistre la correspondance entre  $MN_{ip}$  et  $MN_{coa}$  dans son cache. Les paquets suivants seront directement envoyés à l'adresse  $MN_{coa}$  en utilisant une extension d'entête IPv6 (*Routing extension header*) contenant l'adresse  $MN_{ip}$  pour l'identification du mobile. En recevant un paquet contenant cet entête, la couche IP du mobile permute l'adresse destination  $MN_{coa}$  et l'adresse  $MN_{ip}$  contenue dans l'option et passe le paquet à la couche supérieure.

## 5.2. Mobile IPv6 et les Réseaux Mobiles

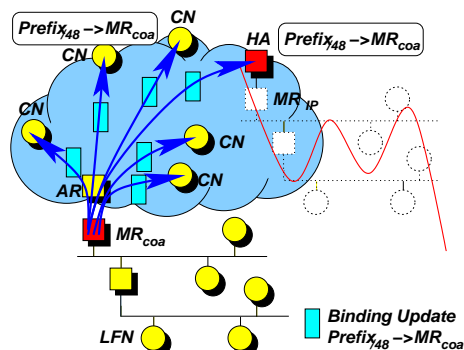
Les concepteurs de Mobile IPv4 proposent de gérer la mobilité des réseaux de manière similaire à celle des noeuds, mais ceci est présenté de manière très succincte, en partant de l'observation qu'un réseau mobile n'est autre qu'un réseau rattaché à un routeur mobile, c'est-à-dire un noeud comme une autre (voir [PER 96] section 4.5, [PER 98] section 5.12, [SOL 98] section 11.2). A chacun de ses déplacements, le MR obtient une adresse temporaire  $MR_{coa}$  qui est enregistrée auprès de son HA comme dans le cas d'une station mobile. La solution est d'autant plus simple que tous les paquets de données passent nécessairement par le HA, il n'y a donc pas d'optimisation de routage et de nombreux problèmes subsistent. Mobile IPv6 ne fait plus mention de

cette possibilité, aussi nous sommes-nous attardés à vérifier que les réseaux mobiles peuvent néanmoins être supportés de la même manière, en se tenant à la spécification de Mobile IPv6 :

– **Redirection des paquets vers la position courante** : en respectant le même mécanisme d'enregistrement, le MR doit obtenir une adresse IP temporaire  $MR_{coa}$  dans le sous-réseau visité. Il doit ensuite enregistrer cette adresse temporaire auprès de son HA. Les premiers paquets envoyés par un CN parviennent jusqu'au point d'attachement initial du réseau mobile, c'est-à-dire le HA, qui les intercepte. Malheureusement, si on s'en tient à la spécification, le HA ne sera capable de rediriger que les paquets destinés au seul MR. En effet, rien ne permet au HA de savoir que le BU concerne l'ensemble des MNNs du réseau mobile. Ce problème est détaillé dans [ERN 02a]. Il est donc souhaitable que Mobile IPv6 soit modifié et intègre une notion de préfixe afin que le HA et les CNs utilisent la même adresse temporaire pour chaque adresse  $MNN_{ip}$  ayant un préfixe identique à celui de l'adresse  $MR_{ip}$  enregistrée dans leur cache.

– **Optimisation du routage** : bien que ces modifications soient possibles, nous devons aussi analyser la question de l'optimisation de routage. Dans le cas de l'optimisation de routage, les CNs se doivent de recevoir périodiquement un BU contenant l'adresse  $MR_{coa}$ . L'envoi des BUs vers les CNs incombe au noeud obtenant l'adresse temporaire, donc au MR. Or, ceci n'est pas permis par la spécification, pour des raisons d'authentification de la provenance des BUs effectuée par les CNs. L'authentification est basée sur une clé que seul l'émetteur peut détenir. Le BU étant émis par le MR, le CN comprendrait que les paquets destinés à l'adresse  $MR_{ip}$  doivent être envoyés via l'adresse  $MR_{coa}$ , mais rien ne lui permettrait de déduire qu'il doit en faire autant pour tous les noeuds qui ont le même préfixe que l'adresse  $MR_{ip}$ . Pour se faire, il faudrait que le MR se fasse passer pour chacun de ses MNNs, en envoyant l'adresse  $MNN_{ip}$  du noeud concerné. Le CN doit alors vérifier que l'émetteur du BU est bien le MNN. Cela nécessiterait un nouveau mécanisme permettant aux MNNs de faire parvenir leur clé au MR. Cette dernière solution est réalisable, mais pas souhaitable car elle viole le principe d'authentification de bout en bout. D'autre part, on constate une possible duplication des BUs dans le cas où un CN correspond avec plus d'un MNN du même réseau mobile. En effet, le MR enverrait alors plusieurs BUs à ce CN, ce qui consommerait inutilement de la bande passante, et le CN enregistrerait alors dans son cache une adresse temporaire  $MR_{coa}$  identique pour tous les mobiles du réseau mobile avec lesquels il communique. Pour pallier à ces problèmes, on peut envisager que les MNNs envoient directement les BUs à leurs propres CNs, mais cela nécessite également des modifications dans la spécification, entre autres un mécanisme pour que les MNNs détectent la mobilité du réseau et obtiennent l'adresse temporaire du MR. On constate également que la gestion de la mobilité du réseau ne se fait plus de manière transparente pour les MNNs, ceux-ci devant y prendre une part active ce qui n'est pas souhaitable non plus.

– **Passage à l'échelle** : les réseaux mobiles étant susceptibles d'embarquer un nombre important de noeuds (de l'ordre de plusieurs centaines), chacun ayant un certain nombre de correspondants, le nombre de CNs croît linéairement avec la taille du



**Figure 3.** *Explosion des messages de contrôle (Binding Updates)*

réseau mobile. Ceci nous permet de faire une comparaison avec la gestion de la mobilité pour les stations mobiles où le paramètre important était le nombre de stations mobiles et non pas celui des correspondants. Au vu du nombre potentiellement élevé de CNs, un grand nombre de sessions peuvent avoir lieu simultanément, toutes transitant via le MR. Ainsi, la quantité de trafic induit par ou vers un réseau mobile est significativement importante d'autant plus que le réseau est grand. Dans un tel contexte, la question de l'optimisation du routage devient cruciale. En appliquant les mécanismes de Mobile IPv6, l'envoi périodique de BUs à chaque CN provoquerait une explosion de BUs, comme cela est montré sur la figure 3. L'explosion de BUs se traduit à la fois par un coût très élevé en ressource mémoire pour garder l'historique des BUs envoyés aux différents CNs, en CPU pour l'envoi des BUs et en bande passante en particulier à proximité de AR où les liens pourraient être congestionnés par un nombre excessif de messages de contrôle. Dans le cas extrême de mobilité enchaînée, le défaut d'optimisation de routage se traduirait par plusieurs niveaux d'encapsulation et par, non pas un routage triangulaire comme dans le cas des stations mobiles, mais par un routage quadrilatéral (deux niveaux de mobilité) voire plus, les paquets transitant par le HA de chaque routeur ou station mobile de la hiérarchie.

### 5.3. Conclusions sur Mobile IP

Nous constatons donc que Mobile IP, en l'état, ne permet pas de supporter les réseaux mobiles. Outre un certain nombre de problèmes qui nécessiteraient simplement la clarification de la spécification Mobile IPv6, nous avons relevé des problèmes de sécurité, et un problème concernant le passage à l'échelle (explosion des BUs). Les mécanismes intrinsèques de Mobile IP doivent être revisités pour permettre un routage optimal tout en considérant la question de la mobilité enchaînée qui accentuerait encore plus la question du passage à l'échelle.

Au vu de nos observations, nous pouvons établir que la gestion de la mobilité des réseaux mobiles doit faire face à un certain nombre de contraintes. Tout d'abord, il convient de supporter les réseaux mobiles en nombre et en taille importantes. Le nombre important de correspondants nous impose de minimiser la quantité de messages de contrôle relatifs à la gestion de la mobilité tout en optimisant le routage. Ces messages doivent être échangés en toute sécurité et authentifiés par leurs destinataires pour s'assurer qu'ils ne sont pas envoyés par un usurpateur. D'autre part, il est souhaitable que la gestion de la mobilité du réseau mobile se fasse de manière transparente du point de vue des noeuds du réseau mobile puisque ceux-ci ne bougent pas réellement. De la même manière, il est préférable que des noeuds mobiles puissent visiter le réseau mobile de manière tout aussi transparente en leur permettant d'utiliser les mécanismes actuels de gestion de la mobilité.

## 6. Nos Propositions d'Extensions à Mobile IPv6

### 6.1. PSBU : les Préfixes de Mise-à-jour

Prefix Scope Binding Update [ERN 02a] est notre solution de base, détaillée dans [ERN 03c]. Le document soumis à l'IETF a été révisé plusieurs fois et propose une extension simple à Mobile IPv6 qui permet d'établir une relation entre le préfixe d'adresse IP commun à toutes les stations résidant dans le *réseau mobile* et l'adresse temporaire obtenue par le *routeur mobile* à chacun de ses points d'ancrage. Cette relation est enregistrée auprès du HA et des CNs au moyen de nouvelles options contenues dans le message de mise-à-jour. Cette extension permet tout d'abord la redirection des paquets destinés aux stations résidants dans le *réseau mobile* en les encapsulant du HA jusqu'au MR. Elle permet également un routage optimal en informant toutes les stations communiquant avec le *réseau mobile* que les paquets destinés à n'importe quelle station résidant dans le *réseau mobile* doivent être redirigés via l'adresse temporaire du *routeur mobile*. En revanche, notre document ne traite pas suffisamment des problèmes de sécurité que ces extensions peuvent poser.

En ce qui concerne la mobilité enchaînée illustrée sur la figure 1, il suffirait que chaque mobile envoie un BU. Le CN du VMN recevrait alors deux BUs, l'un de MR indiquant l'adresse temporaire de MR et l'autre provenant de VMN indiquant l'adresse temporaire de ce dernier. Notre proposition ne détaille pas le mécanisme permettant au CN d'établir le lien entre l'adresse permanente du VMN, celle temporaire du VMN, et celle correspondant au MR. Une modification mineure au niveau de l'algorithme de recherche dans le cache du CN serait suffisante. Cette modification simple n'a pas été proposée car elle n'est pas jugée efficace. Elle générerait en effet un volume de signalisation important dont le coût mériterait d'être opposé à celui d'un routage non optimal. Nous avons préféré laisser cette question de côté dans un premier temps.

## 6.2. Nos Propositions d'Extensions Multipoint

Partant du fait que tous les CNs reçoivent des messages de contrôle au contenu identique, nous avons proposé dans [ERN 00, ERN 01a] une solution combinant des extensions multipoint avec nos extensions PSBU. Nous y considérons principalement le problème du passage à l'échelle lorsque les CNs sont nombreux. Nous proposons de réduire le coût des messages de contrôle induit par Mobile IPv6 pour faire parvenir l'adresse temporaire du *routeur mobile* à tous les correspondants du réseau mobile au moyen de deux techniques multipoint <sup>3</sup>.

La première, dite traditionnelle, établit un arbre de distribution entre le routeur mobile et le groupe multipoint constitué par l'ensemble des correspondants du réseau mobile, en vue d'y transmettre les paquets de contrôle permettant le routage optimal. L'établissement de l'arbre de distribution nécessite de sélectionner un protocole suffisamment peu coûteux pour ne pas perdre le bénéfice de la diminution du coût des messages de contrôle des extensions portées à Mobile IPv6. En l'occurrence, le protocole candidat doit permettre la transmission multipoint entre domaines administratifs, ce qui est un problème activement débattu à l'IETF. Il conviendra de conduire de plus amples études lorsque des progrès significatifs y auront été faits.

La deuxième, plutôt destinée à un nombre assez restreint de correspondants, repose sur une nouvelle technique de routage multipoint qui consiste à enregistrer la liste des correspondants directement dans le message de contrôle (*XCAST*), ce qui évite l'établissement de l'arbre, généralement coûteux, mais limite aussi le nombre de correspondants dû à l'accroissement de la taille du paquet. Un certain nombre de routeurs intermédiaires doivent être capables de dupliquer les paquets lorsque le chemin vers l'ensemble des CNs diffère, tout en retirant les CNs atteignables par l'autre chemin. Dans le cas d'un nombre important de CNs, ceux-ci seraient séparés en plusieurs sous-groupes et classés en fonction de leur préfixe pour maximiser le gain. Cette approche a le mérite de minimiser le nombre de paquets de contrôle pour la mobilité sans nécessiter de message de contrôle pour établir un arbre de distribution.

La performance des propositions multipoint est évaluée par simulation en faisant usage du simulateur NS-2 pour lequel nous avons dû porter un nombre important de modifications et d'extensions [ERN 01b]. Nos résultats, détaillés dans [ERN 01a], montrent que nos propositions diminuent très fortement la proportion de bande passante consommée par les messages de contrôle dans l'Internet (en particulier le lien sans fil par lequel le *routeur mobile* s'attache généralement à l'Internet). Nos simulations, qui se basent sur un scénario de *mobilité globale* dans une topologie hiérarchisée de plus d'un millier de routeurs partagés en une centaine de sites eux-mêmes répartis dans dix domaines, démontrent également que la technique XCAST ne nécessite pas d'être déployée dans l'ensemble de l'Internet. En revanche il est nécessaire de bien choisir les routeurs capables de traiter les paquets contenant une liste de destinataires.

---

<sup>3</sup>. A ce propos, nous ne restreignons pas le terme *correspondant* aux stations correspondantes ; il pourrait en fait s'agir d'un routeur correspondant (*CR*) localisé dans le domaine de la station correspondante.

L'usage des techniques multipoint font aussi face à des problèmes ouverts liés à la sécurité ce qui nécessitera de suivre activement les travaux faits dans ce sens à l'IETF.

## 7. NEMO : le groupe de travail de l'IETF

La problématique des réseaux mobiles a fait sommairement son apparition à l'IETF à plusieurs reprises avant de véritablement prendre son envol à partir de 2000. En août 2000, notre proposition Prefix Scope Binding Update soumise au groupe de travail Mobile IP a mis en avant les insuffisances de Mobile IPv6 pour supporter les stations situées derrière le routeur mobile. En août 2002, nous avons adressé au même groupe un autre rapport technique dressant le cahier des charges, extrait de notre étude [ERN 01a]. À partir de ce moment, la communauté IETF a pris conscience du besoin de traiter cette problématique explicitement. Pour éviter les interférences avec le développement de Mobile IP, nous avons échafaudé la création d'un nouveau groupe de travail. Après de longues négociations, et trois réunions de l'IETF, nous sommes parvenus à nous entendre sur la charte du groupe, ce qui a donné naissance en octobre 2002 au nouveau groupe de travail que nous avons nommé NEMO [url02c]<sup>4</sup>. Les contours de la problématique ont été difficiles à établir notamment à cause de la confusion entre réseaux mobiles et réseaux *ad-hoc*, et aussi à cause de la méconnaissance de la problématique de l'optimisation du routage et son impact sur la sécurité. Finalement, le groupe a décidé d'aborder le problème en deux étapes :

– **Support de Base** : dans un premier temps, le groupe se doit de standardiser une solution simple (*basic support*), permettant de maintenir les sessions, sans optimisation de routage. Cette solution devra être basée sur le modèle Mobile IPv6. Un tunnel est établi entre le HA et le MR. Cette solution doit obéir à un certain nombre de règles édictées dans un document dressant la liste de fonctions requises [ERN 03a]. Plusieurs solutions ont été présentées, dont la notre (Prefix Scope Binding Update) ; le groupe est actuellement en train de débattre la spécification d'une solution unique et commune [DEV 03] rassemblant l'ensemble des idées des diverses propositions qui ont été faites (PSBU [ERN 02a], les Réseaux Mobiles sans Domicile [WAK 03], MRTP [KNI 02] et MRHA [PET 03]). Outre la liste des règles et la solution elle-même, le groupe doit également soumettre un document analysant les problèmes de sécurité. Plus récemment, le groupe a en plus décidé de débattre de la question du multi-domiciliation. Là aussi, un document commun devrait être publié pour analyser le problème et décider des cas qui devront être supportés dans le support de base.

– **Support Étendu** : dans un second temps, le groupe se doit d'étudier la question de l'optimisation de routage (*extended support*). Le livrable est un document de synthèse décrivant la problématique et les approches potentielles (en d'autres termes, pas uniquement la solution reposant sur le modèle de Mobile IPv6). À l'issue de ce document, le groupe devra décider s'il continue ses travaux dans le but de standardiser une

---

4. Non pas en mémoire du capitaine Némé qui pilote le *Nautilus* mais en référence à la transcription anglaise de "la mobilité des réseaux" : Network MObility

ou plusieurs solutions pour l'optimisation du routage, ou déclarer sa fermeture. Dans le premier cas, la charte doit préalablement être redéfinie, au vue des conclusions du document de synthèse. Un certain nombre de documents existent là aussi, le lecteur intéressé se référera au site [url02c].

## 8. Conclusion

Dans cet article, nous avons dressé l'inventaire de notre contribution dans le domaine de la mobilité des réseaux dans IPv6. Notre étude a ouvert une brèche dans la gestion habituelle de la mobilité et mis à jour de nouveaux problèmes qui nécessiteront de plus amples travaux de recherche. En effet, le besoin de déplacer des réseaux est perçu depuis un certain temps, mais aucun travail significatif ne leur avait été consacré avant nos premiers travaux [ERN 01a, ERN 99, ERN 00] qui ont comblé ce manque. Les problèmes qui leurs sont propres n'ayant pas été abordés, donc suffisamment bien détaillés, notre contribution à l'IETF a eu pour résultat une certaine prise de conscience, assez faible dans un premier temps, mais grandissante depuis, dans les rangs de la communauté, qui a abouti avec la création du groupe de travail NEMO. Le support des réseaux mobiles est à présent un sujet qui intéresse de nombreux industriels, allant des fournisseurs d'équipement réseau ou d'électronique grand public jusqu'aux fabricants d'automobiles, en passant par les opérateurs de téléphone et de transport public. La terminologie et le cahier des charges définis dans nos travaux ont ensuite été repris et améliorés dans les différents documents de NEMO.

Faisant suite à l'étude des propositions pour la gestion des *stations mobiles*, nous avons pris Mobile IPv6 comme point de départ à nos travaux. Nous avons mis en avant l'importance de l'optimisation du routage. Or, comme nous l'avons vu, non seulement les spécifications actuelles ne permettent pas de gérer la mobilité des réseaux sans procéder auparavant à certaines modifications, mais de plus les mécanismes intrinsèques de ces spécifications induisent de trop nombreux messages de contrôle pour éviter un routage triangulaire. En effet, l'envoi périodique de l'adresse temporaire à tous les correspondants conduirait à une explosion de ces messages au niveau de leur émetteur et à une quantité excessive de messages de contrôle sur le réseau. Il convient donc soit d'étendre Mobile IP pour supporter les réseaux mobiles efficacement ou de définir de nouvelles approches mieux adaptées.

Un grand nombre de problèmes subsistent, et nous souhaitons particulièrement travailler sur les aspects d'optimisation du routage (y compris les communications de mobile à mobile), du passage à l'échelle, de mobilité enchaînée, de sécurité, de multi-domiciliation. Nous souhaitons également approfondir les autres approches que nous avons dans un premier temps envisagées et qui offrent une alternative à Mobile IPv6. Nous souhaitons aussi détailler une architecture plus générale de la gestion de la mobilité basée à la fois sur nos techniques multipoint et d'autres techniques identifiées lors de l'étude des propositions pour le support des stations mobiles. Le problème de la signalisation étant plus important dans le cas des réseaux mobiles, nous pensons qu'une technique hiérarchique combinée (par exemple en utilisant Hierarchical Mo-

bile IPv6 [SOL 01]) avec la distribution multipoint des messages de contrôle dans un réseau multipoint virtuel pourrait apporter à long terme une solution d'ensemble à la mobilité, prenant en compte la part croissante des éléments mobiles et le type de mobilité (locale et globale).

## Remerciements

Pour leur aide, conseils et leur patience, je tiens à adresser mes remerciements à mes mentors de thèse Claude Castelluccia (INRIA Rhône-Alpes) et Hong-Yon Lach (Motorola Labs Paris). Certains résultats de cette thèse ont été mis en pratique au sein de l'équipe InternetCAR de Keio University, Japon, dont je remercie les membres, particulièrement Julien Charbon, le seul de l'équipe à avoir pu relire et donc commenter cet article. Mais je n'aurais pas pu poursuivre mes travaux dans cette lointaine contrée sans Jun Murai, professeur à Keio University et président du consortium WIDE, avocat hors-norme d'IPv6 pour qui je réserve mes plus chaleureux remerciements.

## 9. Bibliographie

- [DEE 98] DEERING S., HINDEN R., « Internet Protocol Version 6 (IPv6) Specification », Request For Comments n° 2460, December 1998, IETF.
- [DEV 03] DEVARAPALLI V., WAKIKAWA R., PETRESCU A., THUBERT P., « NEMO Basic Support Protocol », Internet Draft n° draft-ietf-nemo-basic-support-00.txt, June 2003, IETF, Work in progress.
- [ERN 99] ERNST T., CASTELLUCCIA C., LACH H.-Y., « Les Réseaux Mobiles dans IPv6 », *13ème congrès DNAC (De Nouvelles Architectures pour les Communications)*, Ministère chargé des Télécoms, Paris, France, December 1999.
- [ERN 00] ERNST T., CASTELLUCCIA C., LACH H.-Y., « Extending Mobile IPv6 with Multicast to Support Mobile Networks in IPv6 », *1st European Conference on Universal Multiservice Networks (ECUMN)*, Colmar, France, October 2000.
- [ERN 01a] ERNST T., « Le Support des Réseaux Mobiles dans IPv6 », PhD thesis, Université Joseph Fourier, October 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/tu-0714.html>.
- [ERN 01b] ERNST T., « MobiWan : NS-2 extensions to study mobility in Wide-Area IPv6 Networks », rapport, 2001, MOTOROLA Labs and INRIA Rhône-Alpes, <http://www.inrialpes.fr/planete/pub/mobiwan/>.
- [ERN 02a] ERNST T., OLIVEREAU A., BELLIER L., CASTELLUCCIA C., LACH H.-Y., « Mobile Networks Support in Mobile IPv6 (Prefix Scope Binding Updates) », Internet Draft n° draft-ernst-mobileip-v6-network-03.txt, March 2002, IETF, Work in progress.
- [ERN 02b] ERNST T., UEHARA K., « Connecting Automobiles to the Internet », *ITST : 3rd International Workshop on ITS Telecommunications*, Seoul, South Korea, November 2002.
- [ERN 03a] ERNST T., « Network Mobility Support Requirements », Internet Draft n° draft-ietf-nemo-requirements-01.txt, May 2003, IETF, Work in progress.
- [ERN 03b] ERNST T., LACH H.-Y., « Network Mobility Support Terminology », Internet Draft n° draft-ietf-nemo-terminology-00.txt, May 2003, IETF, Work in progress.

- [ERN 03c] ERNST T., UEHARA K., MITSUYA K., « Network Mobility from the InternetCAR Perspective », *AINA : International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, Xi'an, China, March 2003.
- [JOH 03] JOHNSON D. B., PERKINS C., ARKKO J., « Mobility Support in IPv6 », Internet Draft n° draft-ietf-mobileip-ipv6-21.txt, February 2003, IETF, Work in progress.
- [KNI 02] KNIVETON T., MALINEN J., DEVARAPALLI V., PERKINS C., « Mobile Router Tunneling Protocol », Internet Draft n° draft-kniveton-mobtr-03.txt, November 2002, IETF, Work in progress.
- [MAN 03] MANNER J., KOJO M., « Mobility Related Terminology », Internet Draft n° draft-ietf-seamoby-mobility-terminology-04.txt, April 2003, IETF, Work in progress.
- [PAR 94] PARTRIDGE C., « Technical Criteria for Choosing IP the Next Generation (IPng) », Request For Comments n° 1726, December 1994, IETF.
- [PER 96] PERKINS C., « IP Mobility Support », Request For Comments n° 2002, October 1996, IETF.
- [PER 98] PERKINS C. E., *Mobile IP, Design Principles and Practices*, Wireless Communications Series, Addison-Wesley, 1998, ISBN 0-201-63469-4.
- [PET 03] PETRESCU A., MIGUEL C.-G., JANNETEAU C., LACH H.-Y., OLIVEREAU A., « Issues in Designing Mobile IPv6 Network Mobility with the MR-HA Bidirectional Tunnel », Internet Draft n° draft-petrescu-nemo-mrha-02.txt, March 2003, IETF, Work in progress.
- [QUI 98] QUINOT T., « An IPv6 architecture for Aeronautical Telecommunication Network », Master's thesis, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications Paris, EUROCONTROL - European Organization for the Safety of Air Navigation - ISA project (IPv6, Satellite communication and ATMode for ATN), 1998, <http://www.eurocontrol.fr/>.
- [SOL 98] SOLOMON J. D., *Mobile IP, The Internet Unplugged*, Prentice Hall Series in Computer Networking and Distributed Systems, Prentice Hall PTR, 1998, ISBN 0-13-856246-6.
- [SOL 01] SOLIMAN H., CASTELLUCCIA C., EL-MAKKI K., BELLIER L., « Hierarchical MIPv6 mobility management », Internet Draft n° draft-ietf-mobileip-hmipv6-05.txt, November 2001, IETF, Work in progress.
- [TAN 96] TANENBAUM A. S., *Computer Networks - Third Edition*, Prentice-Hall International, Inc, 1996.
- [UEH 98] UEHARA K., WATANABE Y., SUNAHARA H., NAKAMURA O., MURAI J., « InternetCAR - Internet Connected Automobiles », *INET*, July 1998, <http://www.sfc.wide.ad.jp/InternetCAR/>.
- [url02a] « InternetCAR web page », May 2002, <http://www.sfc.wide.ad.jp/InternetCAR>.
- [url02b] « InternetITS web page », May 2002, <http://www.InternetITS.org>.
- [url02c] « NEMO web page and mailing list », June 2002, <http://www.nal.motlabs.com/nemo>.
- [url02d] « Nokia's IPv6 NEMO experimentation with Odakyu Line », June 2002, <http://www.nokia.co.jp/IPv6/train.html>.
- [url03] « NAUTILUS web page », April 2003, <http://www.nautilus6.org>.
- [WAK 03] WAKIKAWA R., UEHARA K., MITSUYA K., ERNST T., « Basic Network Mobility Support », Internet Draft n° draft-wakikawa-nemo-basic-00.txt, February 2003, IETF, Work in progress.