

## Spécification formelle et simulation du protocole de mobilité IPv6

Francine NGANI NOUDEM — César VIHO

IRISA/Université de Rennes I  
Campus de Beaulieu  
35042 Rennes Cedex, FRANCE  
[Francine.Ngani,Cesar.Viho]@irisa.fr

**RÉSUMÉ.** Ce papier présente les résultats des travaux de spécification formelle et de simulation du protocole de mobilité IPv6 (MIPv6) en cours de standardisation. Les langages de description formelle SDL (Specification and Description Language) et MSC (Message Sequence Chart) ont été utilisés pour modéliser le comportement des différentes entités de MIPv6. Les problèmes de modélisation ainsi que les choix opérés pour aboutir à un modèle SDL de MIPv6 sont précisés. L'outil ObjectGeode a été utilisé pour effectuer les simulations exhaustives et interactives du modèle SDL. Les propriétés essentielles de MIPv6 ont été vérifiées. Les résultats obtenus n'ont pas mis en évidence des ambiguïtés ni des incohérences. Ce qui a permis de montrer un degré de stabilité de la version actuelle du protocole MIPv6 autorisant ainsi son déploiement dans les nouvelles infrastructures de réseaux.

**ABSTRACT.** This paper presents modeling and simulation results of the work-in-progress IPv6 mobility protocol (MIPv6). The formal description languages SDL (Specification and Description Language) and MSC (Message Sequence Chart) have been used to model the MIPv6 components behavior. Modeling problems and chosen solutions are described in detail. The ObjectGeode tool is used to perform exhaustive and interactive simulations on the obtained SDL model. Main properties of the MIPv6 protocol have been verified. Any ambiguities nor inconsistencies have been observed. This study showed the stable degree of the current version of the MIPv6 protocol, allowing it to be deployed in the new generation network.

**MOTS-CLÉS :** Spécification, SDL, MSC, Simulation, Vérification, Validation, Standardisation, Mobilité, Mobile IPv6.

**KEYWORDS :** Specification, SDL, MSC, Simulation, Verification, Validation, Standardisation, Mobility, Mobile IPv6.

---

## 1. Introduction

Depuis quelques années, la mobilité occupe une place importante dans le domaine des télécommunications. Grâce à sa capacité à prendre en compte la mobilité, le protocole IPv6 (Internet Protocol Version 6) est proposé comme infrastructure pour les systèmes de nouvelle génération. En effet, IPv6 intègre le protocole Mobile IPv6 (MIPv6) défini par l'IETF (Internet Engineering Task Force) qui permet la mise en oeuvre de la mobilité de façon transparente pour les correspondants et les réseaux visités. La détection de mouvement et le handover sont des fonctionnalités essentielles garantissant la continuité des communications lors de ses déplacements [2]. MIPv6 est un protocole en cours de standardisation (le draft 24 [5]) pour lequel il convient de s'assurer qu'il ne comporte pas des incohérences et des ambiguïtés, avant son déploiement effectif dans les réseaux. Il est maintenant reconnu qu'un des moyens permettant d'atteindre cet objectif passe par la spécification formelle utilisant des langages normalisés [1] tels que SDL (Specification and Description Language) [9] et MSC (Message Sequence Chart) [10].

Différents travaux basés sur les techniques formelles ont été effectués pour la modélisation, la vérification et la validation des protocoles de mobilité [4, 6]. Cependant, l'état de l'art ne fait pas état des travaux similaires pour le protocole MIPv6 ou portant sur la modélisation des scénarios de mobilité. Dans ce papier, nous donnons les résultats des travaux de spécification formelle (en SDL et MSC) et de simulation du protocole MIPv6 effectués en utilisant l'environnement ObjectGeode [11].

La section 2 décrit le protocole MIPv6 en mettant l'accent sur ses propriétés principales : les mécanismes de détection de mouvement et de handover. La section 3 présente les difficultés liées à la modélisation et la simulation de la mobilité MIPv6, les choix opérés ainsi que les modèles MSC et SDL qui en découlent. Sur la base du modèle SDL, des simulations interactives et exhaustives à l'aide de l'outil ObjectGeode [11] ont été effectuées pour la vérification et la validation du protocole. La section 4 décrit des propriétés vérifiées et des résultats obtenus. La section 5 donne les conclusions de ce travail et les perspectives qu'il ouvre.

---

## 2. Bref aperçu du protocole MIPv6

Le protocole MIPv6 [5] définit les concepts et les procédures permettant à un noeud mobile de changer de réseau IP de façon transparente pour ses correspondants et les réseaux visités. Un noeud mobile (Mobile Node(MN)) possède une unique adresse mère (Home Address(HoA)) à partir de laquelle il reste toujours accessible. Lors de ses déplacements, il acquiert une adresse temporaire (Care of Address(CoA)) pour établir les connexions dans les réseaux visités. Différents composants IPv6 interagissent pour réali-

ser la mobilité. Le MN représente tout noeud capable de changer son point d'attachement tout en restant accessible via son HoA. L'agent mère (Home Agent(HA)) est un routeur du réseau mère qui détient en permanence l'adresse temporaire courante (CoA) du MN. Le correspondant (Correspondent Node(CN)) est tout noeud qui communique avec le MN. Trois fonctionnalités principales permettent de réaliser la mobilité IPv6.

**Détection du mouvement MIPv6:** Différents signaux permettent au MN de détecter ses mouvements : le changement de lien par le MN (au niveau liaison), l'absence de message de *Router Advertisement (RA)* ou la réception d'un message RA contenant une adresse IP de routeur différente de l'adresse IP du routeur courant du MN (au niveau réseau). Le message RA contient des informations sur le réseau courant. Sous réception d'un signal de mobilité, le MN doit vérifier l'accessibilité au routeur précédent et la validité de son adresse courante en utilisant les mécanismes de *Neighbor Unreachability Detection* [2, 7]. Il émet pour cela un nombre fixé de message *Neighbor Solicitation (NS)* à l'adresse de son routeur courant. Sous réception d'un message *Neighbor Advertisement (NA)*, le MN émet un message *Router Solicitation (RS)* vers le routeur courant pour vérifier la validité de son adresse courante. En l'absence de message RA, le MN conclue à un changement de réseau.

**Auto-configuration d'adresse:** Lorsque le déplacement est confirmé, le MN choisit un nouveau routeur [7] après diffusion d'un message RS à l'adresse multicast des routeurs et réception d'un message RA. Il utilise les informations fournies dans le message RA pour configurer sa nouvelle adresse temporaire (CoA) [8]. L'unicité de sa nouvelle adresse est vérifiée en effectuant le *DAD (Duplication Address Detection)* [7].

**Mise à jour de la localisation:** Pour maintenir ses précédentes communications, le MN informe son agent mère (HA) et ses correspondants (CN) de sa nouvelle CoA via l'échange de messages *Binding Update (BU)* et *Binding Acknowledgement (BAck)*. L'émission d'un message BU aux correspondants est précédée de la procédure de *Return Routability (RR)* [5] pour l'authentification des messages de mise à jour.

---

### 3. Spécification formelle du protocole MIPv6

Afin de mieux comprendre les mécanismes de fonctionnement du protocole MIPv6, les modèles MSC [10] représentant différents scénarios entre composants du réseau ont été définis. Le langage formel SDL [9] a été choisi pour la vérification et la simulation.

#### 3.1. Modèles MSC des fonctionnalités du protocole MIPv6

Le langage MSC est défini par la recommandation Z.120 de l'ITU-T (International Telecommunication Union-Telecommunications Standardisation Sector). La représentation graphique de MSC permet de représenter de manière relativement claire et non ambiguë

des comportements complexes. Pour mieux comprendre les scénarios de mobilité MIPv6, 18 modèles MSC ont été spécifiés présentant les fonctionnalités et les messages échangés entre les différents composants MIPv6. Différentes instances ont été définies pour modéliser la mobilité MIPv6: le correspondant (CN), l'agent mère (HA) et le noeud mobile (MN) (cf. section 2). Trois nouvelles entités se sont avérées nécessaires afin de mettre en évidence la mobilité : le routeur courant (CAR) du MN, le nouveau routeur (CAR) du MN et les autres routeurs (OTHAR) du réseau visité. Le modèle *MSC Handover* de la figure 1 présente différentes fonctionnalités du mécanisme de mobilité MIPv6: mécanisme de signalisation (*MvtSignallisation*), mécanisme de détection de mouvement (*MvtDetection*), mécanismes de choix d'un nouveau routeur et auto-configuration (*ChoiceARandAutoconfigCoA*) et les mécanismes de mise à jour de la localisation (*LocationUpdate*). Le modèle *MSC LocationUpdate* présente les mécanismes de mise à jour de la localisation décrit à la section 2.

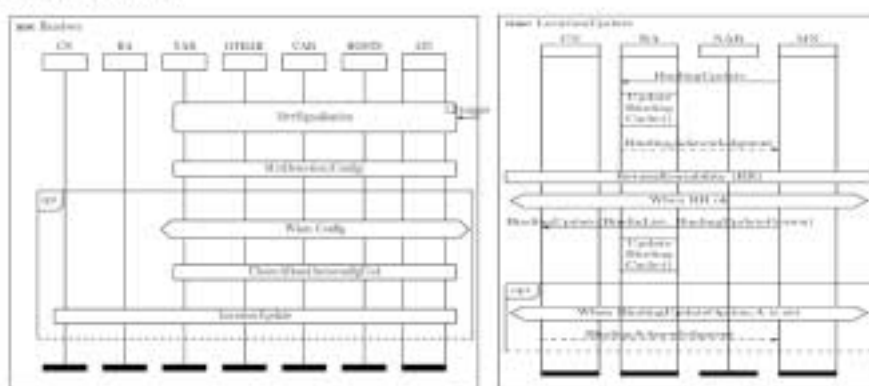


Figure 1. Handover et mécanismes de mise à jour de la localisation MIPv6

### 3.2. SDL et spécification formelle du protocole MIPv6

SDL est défini par la recommandation Z.100 [9] de l'ITU-T pour la spécification et la description des systèmes. C'est un langage formel, graphique et hiérarchique qui autorise la simulation et la validation des systèmes réactifs. Il consiste en un ensemble de processus indépendants qui communiquent entre eux à l'aide des signaux. Spécifier un protocole dans un environnement oblige à faire des choix de modélisation liés aussi bien aux contraintes du langage et de l'outil utilisés qu'aux spécificités de ce protocole.

#### 3.2.1. Spécificités de MIPv6 et choix de modélisation en SDL

Grâce à la modélisation en MSC (cf. section 3.1), on a pu remarquer qu'il y a trois instances d'un routeur d'accès (CAR, NAR et OTHAR). Le NAR, le CAR et l'OTHAR ont

les mêmes caractéristiques et le même comportement mais sont perçus de manière différente par le MN. La vue différente de ces entités par le MN implique des comportements différents de celui-ci qu'il importe de prendre en compte s'il l'on souhaite modéliser la mobilité MIPv6.

Différentes approches ont été explorées. Celle retenue consiste à modéliser indépendamment les composants MIPv6. Des processus *environnement* ont été définis pour simuler la mobilité. Le processus *environnement* intercalé entre le MN et chaque type de routeur simule la mobilité par la réémission ou non des messages reçus en fonction du contexte de mobilité établi. Ce dernier est établi par un *contrôleur* des processus d'environnement. Cette approche offre une grande flexibilité car la modification dans le draft des mécanismes pouvant déclencher la mobilité n'a de conséquence que sur les processus *environnement* et n'influe pas sur le comportement des processus CAR, NAR, OTHAR ou MN.

**Multicast:** Dans MIPv6, le multicast permet au noeud mobile de choisir un nouveau routeur et de configurer sa nouvelle adresse. Le nouveau routeur n'étant pas connu, un message est transmis à l'adresse multicast des routeurs. Sous ObjectGeode, il est difficile d'effectuer ce type de multicast car le destinataire doit être explicitement défini (*TO* ou *VIA*) lors de l'émission d'un signal. La véritable difficulté à prendre en compte le multicast est que l'émission d'un signal multicast ne se fait pas à destination d'une *entité* connue mais d'un *groupe d'entités* satisfaisant une *propriété*. La solution proposée consiste à effectuer au niveau du *contrôleur des processus d'environnement* la redirection du signal au routeur approprié en fonction du contexte de mobilité.

**Modélisation des actions indépendantes:** les mécanismes de Return Routability (RR) définis dans MIPv6 incluent des actions indépendantes. Les concepts offerts par le langage SDL obligent le concepteur à décrire toutes les séquences possibles (le treillis) de ces actions indépendantes.

**Procédure d'initialisation:** Sous ObjectGeode [11], un unique scénario d'initialisation (ou préambule) doit être défini et le système est ensuite exécuté. Concernant le protocole MIPv6, plusieurs mécanismes peuvent déclencher le processus de mobilité, il est alors difficile de définir un unique scénario d'initialisation. La solution choisie consiste à reléguer au niveau du *contrôleur des processus d'environnement* les fonctions d'initialisation.

### 3.2.2. Le modèle SDL de MIPv6

Tenant compte du draft de MIPv6 et des spécificités du langage SDL, un modèle a été défini. Il est composé de 5 blocs SDL, 11 processus et environ 5000 lignes de code.

La figure 2 présente le modèle SDL du système MIPv6 (*mip6\_sys*) et le bloc représentant le routeur d'accès (*AccessRouter*). Le système *mip6\_sys* est composé de cinq blocs : le bloc *MobileNode* où sont modélisés les mécanismes du noeud mobile, le bloc



HomeAgent pour les mécanismes (Home Registration, ...) liés à l'agent mère, le bloc CorrespondantNode pour les mécanismes (Return Routability, Correspondent Registration, ...) liés aux correspondants, le bloc Hosts pour les mécanismes (DAD, Neighbor Discovery, ...) liés aux noeuds appartenant au même lien (ou hôtes) et le bloc AccessRouter pour les mécanismes (Router Discovery, Neighbor Discovery, ...) liés au routeur d'accès. Le bloc AccessRouter est composé de sept processus : les trois types de routeur d'accès (processus CAR, NAR et OTHAR) chacun reliés respectivement à un processus environnement (processus CARMEnv, NARMEnv et OTHARMEnv) et le processus controller. La signalisation échangée est celle définie dans le draft 24 [5].

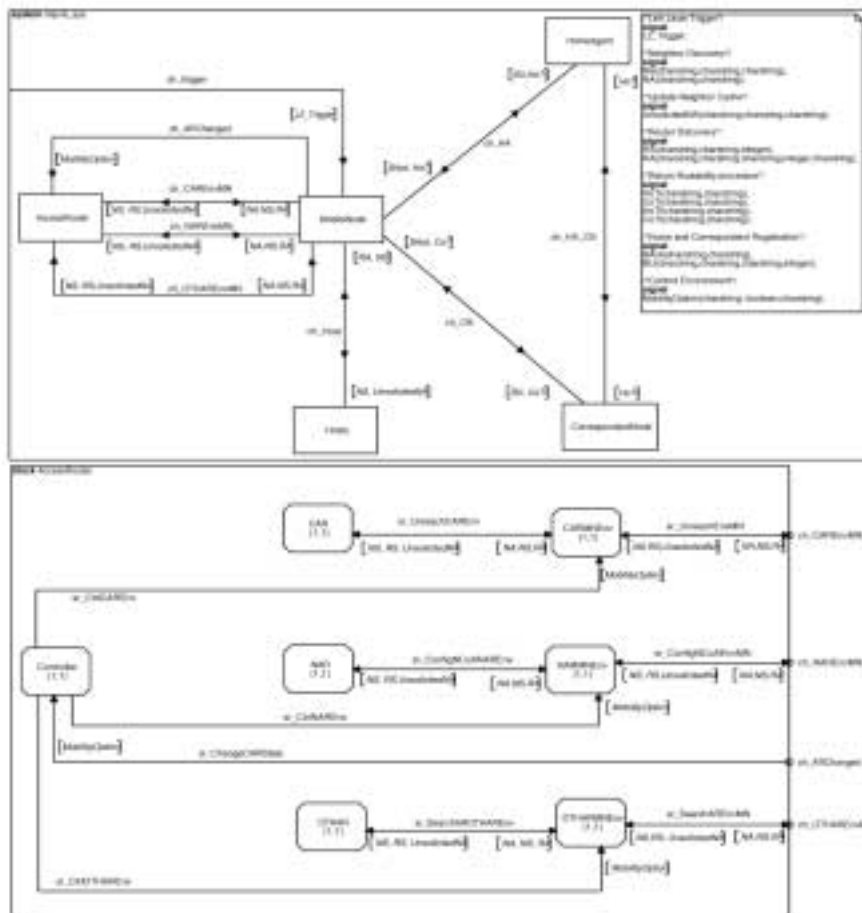


Figure 2. Modèle SDL du système IPv6 et du bloc Handover



#### 4. Simulation, vérification et validation de MIPv6

Sur la base des modèles SDL et MSC obtenus, différentes simulations interactives et exhaustives ont été effectuées sous ObjectGeode. La simulation interactive montre le comportement du système pour des scénarios spécifiques nous permettant ainsi de dire si le modèle a été construit correctement. La simulation exhaustive permet de vérifier des propriétés définies et de ce fait de déduire si le protocole spécifié est correct.

La figure 3 présente six étapes principales d'un exemple de modèle MSC généré lors de la simulation interactive sous ObjectGeode.

- (1) Le contexte de mobilité est modifié par le processus *Controller*. Pour cela, il émet des messages *mobilityoption(...)* aux processus *environnement* afin d'indiquer que le processus *CAR* n'est plus accessible et que le processus *NAR* le devient.
- (2) Sous réception d'un signal de mobilité *L2\_Trigger*, le processus *MobileNode* vérifie l'accessibilité au routeur courant en l'occurrence le processus *CAR*.
- (3) Au cours de la vérification de l'accessibilité (*NS(...)*), le processus *MobileNode* détecte que le routeur d'accès a changé (absence *NA(...)* provenant du processus *CAR*).
- (4) Le processus *MobileNode* configure une nouvelle adresse avec le processus *NAR* en utilisant les informations contenues dans le message Router Advertisement (*RA(...)* sur la figure 3). Le processus *NAR* devient ainsi le nouveau routeur d'accès courant du noeud mobile.
- (5) Le processus *MobileNode* effectue la mise à jour de sa nouvelle adresse (*BU(...)/Back(...)*) avec l'agent mère ici le processus *HomeAgent*.
- (6) Le processus *MobileNode* exécute la procédure de Return Routability avec ses correspondants en l'occurrence le processus *CorrespondantNode* puis effectue la mise à jour de sa nouvelle adresse (messages *HoT(...)*, *CoT(...)*, *HoT(...)* et *CoT(...)* sur la figure 3).

En dehors des simulations interactives, différentes propriétés ont été vérifiées parmi lesquelles, les trois essentielles suivantes:

- (P1) *Neighbor Unreachability Detection* [8]: la vérification de l'accessibilité au routeur courant est toujours effectuée pour tout signal de mobilité.
- (P2) *Address Autoconfiguration* [8] et *DAD* [7]: la configuration d'adresse est toujours effectuée lorsque le noeud mobile change de réseau.
- (P3) *Location Update* [5]: le Binding Update est toujours effectué lors du changement de réseau IP.

Des observateurs ObjectGeode ont été définis à cet effet. A titre d'exemple, le tableau 1 donne les résultats de la simulation exhaustive du système SDL pour la propriété P3.



Figure 3. Modèle MSC du mécanisme de mobilité MIPv6.



Number of states/ transitions	20000/ 31205
Duration	45 s
Transitions coverage rate	47.90 (62 transitions not covered)
States coverage rate	84.62 (8 states not covered)
Observer obs_BindingUpdate	0 errors, 1 success, 0 deadlocks

**Tableau 1.** Résultats de la simulation exhaustive du "LocationUpdate".

## 5. Conclusion

Dans ce papier, nous avons présenté les résultats de la simulation des mécanismes de mobilité du protocole MIPv6 en cours de standardisation. Une spécification formelle en SDL et MSC a été effectuée dans l'environnement ObjectGeode. Des simulations ont été effectuées et ont permis de vérifier les propriétés essentielles du protocole MIPv6. Aucune ambiguïté ni d'incohérence n'a été détectée. Sans être une garantie absolue, ceci donne néanmoins une indication sur la stabilité de ce protocole qui peut aider dans le processus de standardisation et qui permet d'envisager le déploiement de MIPv6 dans les nouvelles infrastructures des réseaux.

Comme suite à ce travail, nous étudions l'utilisation de cette spécification formelle pour la génération automatique des tests de conformité des composants MIPv6.

## 6. Bibliographie

- [1] AMYOT D., ANDRADE R., LOGRIPPO L., SINCENNES J., YI Z., « Formal Methods for Mobility Standards », *IEEE 1999 Emerging Technology Symposium on Wireless Communication & Systems. Testing of communicating systems XIV. Application to Internet Technologies and Services, Texas-USA*, April 1999.
- [2] DALEY G., CHOI J., « Movement Detection Optimisation in Mobile IPv6 », *MobileIP working group. Internet draft.*, May 2003.
- [3] HINDEN R., DEERING S., « Internet Protocol version 6 (IPv6) Addressing Architecture », *RFC 3513, The internet society*, April 2003.
- [4] HORVATH E., « AD-HOC protocol modelling, validation and automated test suite generation », *Testing of communicating systems XIV. Application to Internet Technologies and Services, Berlin - Germany. TSERG, School of Information Technology and Engineering, University of Ottawa*, p. 235-245, March 2002.
- [5] JOHNSON D., PERKINS C., ARKKO J., « Mobility Support in IPv6 », *IETF MobileIP working group. Internet draft. The internet society*, June 2003.
- [6] MACKAYA M., KONÉ O., CASTANET R., « Modelling Location Operation in UMTS Networks », *ACM, Georgia - USA.*, September 2002.



- [7] NARTEN T., NORDMARK E., SIMPSON W., « Neighbor Discovery for IP version 6 (IPv6) », *RFC 2461, The internet society*, December 1998.
- [8] NARTEN T., THOMSON S., « IPv6 Stateless Address Autoconfiguration », *RFC 2462, The internet society*, December 1998.
- [9] « Specification and Description Language (SDL) », *ITU-T Recommendation Z.100*, August 2002.
- [10] « Message Sequence Chart (MSC) », *ITU-T Recommendation Z.120*, November 2002.
- [11] « Les outils ObjectGoode », <http://www.verilog.org>.
- [12] <http://www.ietf.org/html.charters/mobileip-charter.html>.

