
Marionnet/Iutoppix : un environnement pédagogique pour la simulation de réseaux locaux

Conférence EIAH 2007 (Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain)

Jean-Vincent Loddo — Thierry Hamon

*LIPN – UMR CNRS 7030
99 av. J.B. Clément, F-93430 Villetaneuse, FRANCE
Tél. : 33 1 49 40 28 32, Fax. : 33 1 48 26 07 12
prenom.nom@lipn.univ-paris13.fr*

RÉSUMÉ. Cet article présente la réalisation d'un outil de simulation de réseau local pour l'apprentissage de la gestion d'un réseau informatique. Cet outil, appelé Marionnet/Iutoppix, s'appuie sur les possibilités qu'offre conjointement la technologie de CD/DVD auto-amorçable « Live CD » et la fonctionnalité particulière des noyaux Linux récents, le User Mode Linux (UML), qui permet de lancer un ou plusieurs autres noyaux par dessus le noyau principal comme s'il s'agissait d'applications ordinaires. L'outil a été exploité dans le cadre de travaux pratiques d'administration système et de gestion des réseaux.

ABSTRACT. This article presents the development of system for simulating a local network in the context of teaching the network management. This tool, called Marionnet/Iutoppix, is based on the live CD/DVD technology and a functionality of the recent Linux kernel: User Mode Linux (UML). This functionality allows to manage several kernels as standard applications running in the user space. The system has been tested during teachings of system administration et network management.

MOTS-CLÉS : Simulation, réseau local, plate-forme d'apprentissage

KEYWORDS: Simulation, local network, learning platform

1. Introduction

Dans le cadre de travaux pratiques de gestion des réseaux et d'administration système, l'accès à des machines modifiables à loisir et à des composants spécialisés, tels que les répéteurs (hub) les commutateurs (switch) et les routeurs (routeurs), est primordial. On est toutefois vite confronté au coût que représente un tel matériel si chaque étudiant doit en disposer. De plus, se pose par la suite le problème des révisions pour les étudiants. Afin de répondre à ces problèmes, nous avons développé un prototype de simulateur de réseau local, appelé Marionnet/Iutoppix. Dans un contexte pédagogique, chaque étudiant dispose et peut modifier l'ensemble des composants d'un réseau. Marionnet/Iutoppix est un système à deux niveaux : la couche Iutoppix inclut une technologie de CD/DVD auto-amorçable dérivée de Knoppix (?) et permet d'amorcer et d'exécuter l'application Marionnet. Cette dernière permet la définition interactive d'un réseaux de machines virtuelles, leur lancement et un certain contrôle de leur exécution (arrêts, redémarrages, ...).

L'exploitation de la technologie de virtualisation UML(?, ?) à des fins pédagogiques justifie le choix d'une architecture à deux niveaux par un besoin important de ressources disque et processeur. En effet, la technologie des CD/DVD auto-amorçables (« Live-CD » ou « Live-DVD ») qui permet de démarrer un ordinateur par le lecteur de CD/DVD sans utiliser le disque dur, présente, à elle seule, un potentiel pédagogique extraordinaire. Les avantages sont multiples : il est possible de disposer d'un système d'exploitation complet sans pour autant modifier l'ordinateur sur lequel on désire travailler. On peut aussi tirer partie de l'importante capacité de stockage d'un CD/DVD pour inclure des documentations volumineuses ou pour mettre à disposition des logiciels nécessitant beaucoup d'espace disque. Enfin, on peut régler le système pour optimiser l'exécution des logiciels inclus et particulièrement gourmands en ressources disque, mémoire ou processeur.

Le simulateur de réseaux locaux que nous présentons dans cet article est un exemple de logiciel nécessitant d'importantes ressources. D'une part, l'ensemble des machines virtuelles du réseau simulé, ainsi que toutes leurs applications, seront à la charge du système hôte, donc de son processeur et de sa mémoire vive. Pour fonctionner au mieux, certains réglages s'imposent, tels qu'une recompilation du noyau hôte linux pour y inclure notamment des fonctionnalités et optimisations spécifiques à UML. D'autre part, les machines virtuelles correspondent à des noyaux linux indépendants du noyau hôte et avec un système de fichiers qui est, lui aussi, indépendant de celui de l'hôte. Par exemple, l'hôte pourra être composé d'un noyau linux de la famille 2.6.x et d'un système de fichiers Debian, alors que les machines virtuelles pourront tourner avec un noyau moins récent, par exemple de la famille 2.14.x, équipé d'un système de fichiers d'une autre distribution (Mandriva, Suse,...). Cela signifie qu'une image de la distribution hébergée (dont la taille se mesure en dizaines voire centaines de Méga octets) devra être nécessairement intégrée au logiciel de simulation.

Une plateforme CD/DVD auto-amorçable paraît donc un bon choix pour permettre à un simulateur de réseau d'être programmé et de fonctionner confortablement. Cela

permet aussi d'aller plus loin dans les fonctionnalités offertes à l'utilisateur. Il est en effet préférable d'offrir aux étudiants, pour leur avenir en entreprise, la possibilité de s'exercer sur un réseau de machines le plus possible hétérogènes. Il est ainsi important de donner à l'utilisateur le choix de l'image pour chaque machine virtuelle constituant le réseau. Certes, toutes les machines virtuelles seront des machines linux (limite de la technologie UML), mais on donnera toutefois le choix entre plusieurs versions du noyau et plusieurs distributions de linux (Debian, Red Hat, Mandriva, Suse,..). Inclure ce choix dans le logiciel de simulation implique de sauvegarder sur le support CD/DVD une image de l'installation de chaque distribution linux hébergée par le système hôte. Des optimisations sont bien sûr possibles (partage de bibliothèques entre les différents systèmes), mais difficiles à mettre en oeuvre. On exploite donc au maximum les possibilités de stockage de ce type de support.

Nous présentons à la section suivante les travaux portant sur la technologie « Live CD ». Puis, nous présentons le simulateur de réseau à la section 3. Enfin, à la section ??, nous rendons compte de l'utilisation de l'outil dans le cadre de travaux pratiques.

2. Etat de l'art

2.1. Principe des live-cd ou live-dvd

Le principe d'un CD/DVD auto-amorçables est celui de permettre l'amorçage d'un ordinateur PC à partir du lecteur de CD/DVD, en utilisant uniquement la mémoire vive (RAM) de l'ordinateur. Techniquement, ceci est possible avec le système d'exploitation libre Linux par ses fonctionnalités de création et de gestion des Live File System (LFS) (?; ?; ?).

À notre connaissance, le premier CD/DVD live exploitant ce type de fonctionnalité pour offrir un système Linux live à la fois complet et ergonomique a été réalisé en France dans le cadre du projet Demolinux (?). Démarré en 1998, les différentes éditions de ce Live-CD incluait des environnements de bureau (Gnome et KDE), des applications bureautiques (Star Office de Sun Microsystems) et plusieurs centaines d'autres applications, dont la présence se justifiait principalement par des raisons pédagogiques, les trois auteurs étant enseignants universitaires en informatique.

Après le projet Demolinux, qui avait connu dans les années 1998-2001 un succès considérable à l'échelle planétaire, de nombreux autres CD/DVD live ont vu le jour dans le monde du logiciel libre. Depuis 2001, la référence mondiale dans ce domaine est devenue incontestablement le système allemand Knoppix (?; ?).

2.2. Applications de la technologie

Outre l'aspect démonstratif, plusieurs autres applications existent de cette technologie. Par exemple, une utilisation souvent mise en avant, déjà à l'époque de De-

molinux, est celle d'utiliser ce type de CD/DVD comme un outil de réparation et de dépannage d'un système installé sur le disque (Linux ou Windows).

Tous les distributeurs principaux de Linux (Red Hat, Mandriva, Novell Suse, Ubuntu, Gentoo,...) offrent actuellement une version « live » téléchargeable de leur distribution, de façon à encourager les utilisateurs de PC à essayer le système d'exploitation Linux. En effet, tout système « live » sera, par définition, capable de fonctionner sans installation sur disque dur, tout en donnant un aperçu fidèle de ce que le système offrira une fois installé sur la machine.

Aussi, on peut considérer un CD/DVD live comme une sorte d'ordinateur "de poche", qui permet de transporter sur soi un système Linux familier que l'on peut rendre opérationnel en quelques minutes, sur n'importe quel ordinateur PC.

Une autre utilisation remarquable, elle aussi actuellement très répandue, est celle qui permet aux éditeurs de logiciels de diffuser leurs applications, en version démo ou complète, sur des CD/DVD fonctionnant toujours comme ils le souhaitent, sans problèmes de configuration, et sans corrompre l'ordinateur de l'utilisateur.

3. Simulateur de réseaux d'ordinateurs

3.1. Description

La grande majorité des étudiants rencontrent des difficultés à approfondir ou répéter les travaux pratiques de gestion de réseaux ou d'administration système : ceux-ci nécessitant un matériel spécifique ou pouvant entraîner des dysfonctionnements en cas d'erreur sur l'ordinateur familial. Partant de ce constat, nous avons développé un simulateur de réseaux offrant les mêmes possibilités que lors de travaux pratiques. L'objectif pédagogique est la pratique des réseaux d'ordinateurs, des protocoles de communication et des services système et réseaux. Il s'agit de simuler le travail effectué dans une salle de travaux pratiques (TP) réseau : d'une part, la définition du réseau, c'est-à-dire le « câblage » des machines entre elles et avec les dispositifs de répétition (hub) ou de commutation (switch) ; d'autre part, la configuration du réseau et celle des services à activer sur l'ensemble des machines (?; ?). La simulation est rendue techniquement possible sous Linux en exploitant une fonctionnalité particulière du noyau, le User Mode Linux (UML) (?), qui permet de lancer un ou plusieurs autres noyaux par dessus le noyau principal (appelé noyau « hôte ») comme s'il s'agissait d'applications ordinaires. En effet, les noyaux ainsi lancés (appelés noyaux « uml ») tournent en espace utilisateur comme toute autre application (?). De plus, ils peuvent être associés à des fichiers particuliers dont le contenu est une image de disque dur. Autrement dit, le disque dur est en quelque sorte « enveloppé » dans un fichier tout à fait ordinaire du point de vue de la machine hôte. Ainsi, le lancement d'un noyau uml sur un fichier contenant l'image d'un disque dur simule exactement le démarrage réel d'un vrai système Linux sur un véritable matériel. Si on ajoute enfin la simulation des répéteurs (hub) et des commutateurs (switch) par le biais de processus facilement programmables, on obtient une possibilité extraordinaire : celle de simuler fidèlement

des réseaux locaux tels que ceux dont disposent les étudiants dans une salle de TP réseau.

Un tel simulateur de réseaux d'ordinateurs peut également être vu comme un logiciel éducatif facilitant l'apprentissage à distance et le travail personnel. L'étudiant peut ainsi travailler à distance : tout exercice de TP réseau (à quelques rares exceptions près) peut avoir lieu sur une seule machine, l'hôte qui héberge le réseau virtuel, chez soi, sur son poste fixe ou son ordinateur portable. Il peut télécharger l'énoncé du TP sur un site regroupant des énoncés, réaliser l'exercice et même rendre sa copie. En effet, une fonctionnalité de plus du noyau Linux, le Copy On Write (COW), permet de découper une image de disque en deux parties complémentaires (?) : une partie principale et « lourde » (en Méga ou Giga octets) accessible en lecture seule (read-only) contenant le gros de l'image, et une partie auxiliaire « légère » accessible en lecture-écriture (read-write) et contenant juste les modifications apportées à la partie lourde. Ainsi, l'étudiant pourra rendre à l'enseignant seulement les parties légères des disques du réseau virtuel, représentant précisément le travail effectué sur l'ensemble du réseau. Grâce à la taille limitée des parties légères (typiquement quelques Méga octets) il pourra aisément renvoyer sa copie par internet (par courrier électronique à l'enseignant ou en téléchargement sur un site ad-hoc).

3.2. Mise en œuvre

En tirant parti de notre expérience avec Demolinux (?), nous avons exploité la version 3.8 de Knoppix (?), plus à jour que Demolinux et plus facile à adapter à nos besoins, pour réaliser un cdrom auto-amorçable francisé et spécialisé pour les enseignements techniques(?). Il est ainsi possible de disposer d'un système d'exploitation Linux sans avoir recours à une installation sur disque ou à la modification d'une configuration existante. Nous avons également exploité la fonctionnalité User Mode Linux (UML), qui permet sur le même ordinateur hôte de démarrer plusieurs ordinateurs virtuels. Cette fonctionnalité peut être pleinement exploitée dans le cadre de travaux pratiques réseau. Ainsi, nous avons réalisé un DVD live, dérivé de Knoppix, contenant un prototype d'application exploitant un noyau UML (fournis par (?)).

3.3. Fonctionnalités de Marionnet

Tout en étant qu'un simple prototype, l'application permet toutefois à un étudiant de définir et de lancer un réseau virtuel, puis de configurer et superviser tous les éléments du réseau en exécution. Dans une première phase, l'étudiant ajoute un par un les éléments du réseau Ethernet qu'il souhaite simuler : machines, hubs, switches, câbles droits, câbles croisés, câbles series (Null Modem). Pour chaque élément ajouté, il devra en préciser les caractéristiques. Par exemple, en ajoutant une machine (cf. Figure ??), il devra préciser :

- le nom de la machine

6 Environnements Informatiques pour l'apprentissage Humain, Lausanne 2007

- le nombre d'interfaces réseau (eth0, eth1,...)
- le nombre de ports serie (tty0, tty1,...)
- la version du noyau linux
- la distribution utilisée (Debian, Mandriva, Suse,...)
- le type de terminal (textuel ou graphique) pour la prise en main de la machine virtuelle

Comme deuxième exemple, considérons l'ajout d'un câble droit (cf. Figure ??). L'utilisateur précisera dans ce cas les caractéristiques suivantes :

- le nom du câble
- les deux paires (machine, interface) et (switch/hub, port) que le câble relie
- d'éventuels défauts de fonctionnement (retard, perte de paquets)

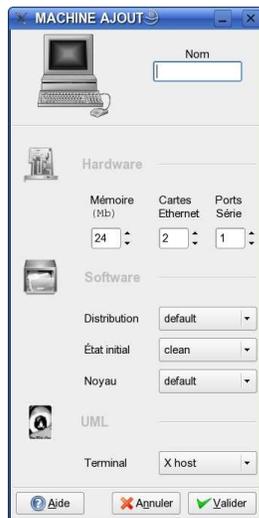
L'étudiant devra fournir des informations similaires pour l'ajout d'un switch (cf. Figure ??).

L'objectif pédagogique d'un tel fonctionnement est celui de mimer le travail de câblage que l'étudiant réalise dans une salle de travaux pratique réelle. La construction interactive du réseau virtuel se fait par les mêmes étapes qu'auraient lieu dans une vraie salle réseau et avec des vrais composants. Un module de Marionnet permet à tout instant de traduire l'état du réseau défini jusque à présent dans une image au format JPEG qui est affichée à l'écran et recalculée automatiquement après chaque changement de configuration du réseau (ajout, élimination, modification d'un élément). Le compilateur intégré à Marionnet traduit la définition courante du réseau dans le langage formel de description de graphes de l'utilitaire unix *dot* (pour plus de détail voir <http://www.graphviz.org/>). Ensuite, la commande externe *dot* est appelée par Marionnet pour traduire la sortie du module de compilation en image JPEG.

La compilation à la volée de la représentation graphique du réseau est réalisée ainsi de façon très efficace, sans délais d'attente significatifs, et le rendu graphique est dans la plupart des cas très satisfaisant. La Figure 2 illustre le rendu correspondant à une définition où le nombre de composants réseaux avoisine la vingtaine : une petite dizaine de machines, switch, hub, etc (noeuds du graphe) et une petite dizaine de câbles différents (arêtes du graphe) sont agencés de façon automatique dans l'aire de dessin.

Ces traits interactifs et la compilation à la volée de l'image du réseau caractérisent Marionnet/Iutopix par rapport à d'autres outils de définition et simulation d'un réseau UML tels que Netkit (?) et VNUML (?).

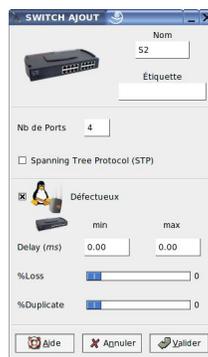
Dans une deuxième phase, successive au lancement des machines virtuelles et des dispositifs (hub, switch,...) définis, l'utilisateur aura accès à un terminal (textuel ou graphique) pour chaque machine (cf. Figure ??). Il devra se loguer et pourra commencer la configuration des interfaces réseaux (*ifconfig*, *route*, ...), tester les liens établis (*ping*, *fping*, *netperf*, ...), démarrer des services (*telnet*, *sshd*, *apache*, *ftp*, ...)



(a) Ajout d'une machine



(b) Ajout d'un câble droit



(c) Ajout d'une switch

Figure 1. Création d'un réseau virtuel dans le prototype avec interface graphique en GTK)

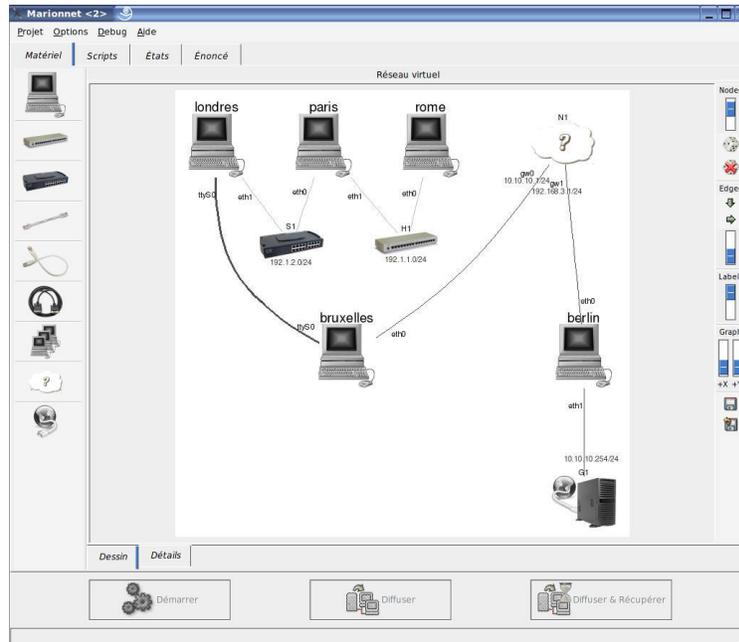


Figure 2. Visualisation du réseau dans le prototype initial

et des clients (ssh, lynx, firefox, ...). Il pourra aussi observer les trames circulant dans le réseau avec tcpdump ou ethereal.

3.4. Valeur pédagogique

Les bénéfices du simulateur Marionnet se combinent avec ceux de son support Iutoppix. Les étudiants profitent de tous les avantages pratiques d'un live-dvd, c'est-à-dire d'un système « de poche » transportable et qui préserve l'état de leur ordinateur familial. Ils peuvent faire, ou refaire, chez eux, à leur rythme, les travaux pratiques sans disposer des différents matériels nécessaires (machines, commutateurs, routeurs, câbles,...). En plus, le travail sur un réseau virtuel offre paradoxalement, d'un point de vue pédagogique, certains avantages par rapport au travail dans une vraie salle de TP réseau :

1) Être le seul « maître à bord »

Dans la pratique, essentiellement par manque de moyen, chaque étudiant s'occupe au plus d'un seul élément du réseau, la configuration globale du réseau étant réservée en général à un groupe d'étudiants plutôt qu'à un seul étudiant. Typiquement plusieurs réseaux sont mis en place dans une salle de TP, chaque réseau est affecté à un groupe, et chaque étudiant du groupe est responsable d'une seule machine. Cela n'est, certes,

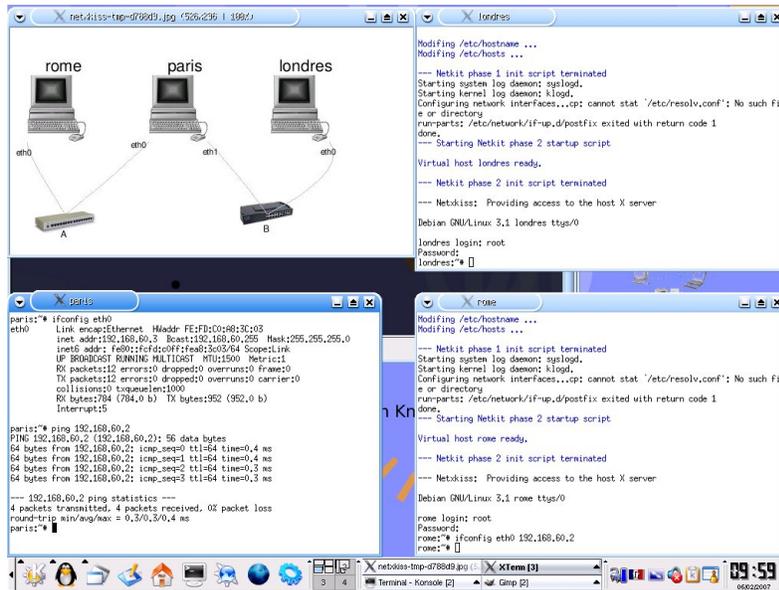


Figure 3. Exécution du réseau virtuel

pas satisfaisant du point de vue pédagogique, mais aucun autre type de fonctionnement n'est envisageable dans une salle de TP réseau normalement équipée. Au contraire, permettant à l'utilisateur d'être le seul responsable de tout le réseau, le seul « maître à bord », le simulateur offre un confort de travail qui est, autrement, matériellement impossible (à moins, bien sûr, d'avoir des salles avec des surfaces énormes, beaucoup de machines et très peu d'étudiants !).

2) Travailler avec du matériel onéreux

Le coût de certains matériels, parfois très présents sur le marché des réseaux et télécom, représente une limite économique pour l'équipement d'une salle de TP d'un établissement public. Par exemple, un enseignant ne pourra raisonnablement pas prévoir une utilisation massive de routeurs CISCO, leader de ce type de marché, pour réaliser des exercices de routage sophistiqués impliquant de nombreux routeurs par groupe d'étudiants. En revanche, il est tout à fait possible de simuler fidèlement (à quelques détails près) un routeur CISCO par le biais d'une machine virtuelle simplement équipée d'un logiciel libre (p.e. Quagga, cf. <http://www.quagga.net/>) capable d'implémenter la plupart des protocoles de routage standards existants.

3) Expérimenter des scénarios anormaux

La capacité de simuler fidèlement le comportement d'un appareil tel qu'un répéteur (hub), un commutateur (switch) ou un routeur (router), n'exclut pas la possibilité d'en simuler des pannes ou des dysfonctionnements occasionnels (retards, pertes de paquets, duplication, ...). Ce type de simulation ouvre la voie à des exercices du type

« trouver la panne », qui seraient irréalisables dans une salle de TP ordinaire (à moins d'endommager le matériel !).

4) Exercices de dépannage réseau

Les pannes ou les dysfonctionnements occasionnels d'un service ou d'une liaison représentent un type de problème très courant auquel sont confrontés les ingénieurs réseau dans leur travail au quotidien. Si les pannes ou les dysfonctionnements se manifestent par des symptômes, ces derniers sont parfois dans un rapport assez lointain et indirect avec leur cause. Il faut donc apprendre à observer un réseau pour comprendre et déceler les problèmes qui s'y présentent. S'il paraît invraisemblable d'organiser ce genre d'exercice dans une vraie salle réseau, il paraît en revanche possible pour un enseignant de réaliser ce type d'expérience dans un réseau virtuel. L'enseignant spécifiera dans un premier temps le réseau virtuel avec ses dysfonctionnements à l'aide du logiciel Marionnet/Iutoppix. Lorsqu'il sera dans une salle de TP ordinaire avec les étudiants, il diffusera la spécification du réseau virtuel sur tous les postes et les étudiants la chargeront avec leur instance du logiciel Marionnet/Iutoppix. Ensuite, chacun d'entre eux lancera l'exécution du réseau virtuel et tentera d'en observer les problèmes et d'en détecter les causes.

Au-delà de l'utilisation individuelle sur l'ordinateur familial, ce type d'application peut donc représenter pour un établissement une alternative économique dans la réalisation d'une salle de travaux pratiques. En effet, les travaux pratiques réseaux, qui pour le moment ne peuvent être réalisés que dans des salles spécialement équipées, pourront l'être dans des salles informatiques ordinaires (en installant le simulateur sur les machines). Cette alternative pourrait s'avérer intéressante pour une résolution occasionnelle des conflits de réservation des salles de TP réseaux, souvent peu disponibles par rapport à la demande des enseignants.

4. Utilisation du simulateur dans un contexte pédagogique

Ce type de fonctionnement a déjà été testé avec succès lors d'un contrôle de fin d'année de Travaux Pratiques réseaux en DUT Formation Continue (FC) à l'IUT de Villetaneuse. À cette occasion, dans une salle de TP ordinaire (et non une salle spécialisée pour des TP réseau), chaque étudiant devait configurer un réseau de trois machines virtuelles connectées par deux commutateurs (switch) virtuels, l'ensemble des éléments du réseau virtuel étant gérés par le prototype de simulateur de réseaux. À la fin du contrôle, un petit logiciel auxiliaire permettait aux étudiants de transmettre sur le PC de l'enseignant (par une « vrai » connexion réseau) tous leurs disques virtuels, c'est-à-dire leur « copie » du contrôle.

De même, le simulateur de réseau local est utilisé pour les travaux pratiques d'administration système d'un Mastère en informatique et d'une formation d'ingénieurs en informatique. Les étudiants ont ainsi pu concevoir leur réseau puis mettre en place différents services : annuaires (NIS, DNS), serveur de messagerie, serveur Web, pare-feu, etc.

Cet outil est très bien accueilli par les étudiants qui y voient un moyen d'accéder en toute liberté, à l'ensemble de la configuration d'un réseau sans crainte d'erreur dommageable, et surtout de réviser le travail effectué en TP. La principale difficulté rencontrée, par certains étudiants, se situe au niveau de la virtualité des machines ou du matériel qu'ils manipulent. Pour certains, il est difficilement concevable que les composants virtuels soient indépendants de la machine hôte.

5. Conclusion

Nous avons développé une application offrant la possibilité de simuler le fonctionnement de réseaux locaux. Celle-ci exploite la fonctionnalité UML (User Mode Linux) des noyaux Linux. Intégrée à un Live CD/DVD, nous disposons d'un outil puissant permettant de répondre à de nombreux besoins pédagogiques rencontrés en travaux pratiques de gestion des réseaux et d'administration système. A travers plusieurs utilisations, nous avons pu constater la pertinence de cette approche. D'une part, ce support permet d'améliorer le contenu pédagogique de TPs (simulation de pannes hardware, etc.). D'autre part, les étudiants ont ainsi la possibilité de travailler en dehors des séances sur un matériel similaire, mais virtuel, à du matériel professionnel coûteux. Cet outil est également un exemple très significatif de logiciel éducatif facilitant l'apprentissage à distance.

Ce prototype a permis de bien comprendre et analyser l'existant. Nous envisageons d'une part, une extension des fonctionnalités au niveau de l'interface, et d'autre part, la possibilité de choix dans les systèmes d'exploitation utilisés sur les différents composants (différentes distributions Linux, systèmes Windows). Cette dernière fonctionnalité nécessite un changement profond dans la gestion des machines virtuels. Nous prévoyons d'abandonner la fonctionnalité UML et d'intégrer la technologie Xen (?).

6. Bibliographie

- Balat V., Cosmo R. D., Loddo J.-V., « DemoLinux », , <http://www.demolinux.org/>, 2002.
- Bovet D. P., Cesati M., *Understanding the Linux Kernel*, Editions O'Reilly, 2005.
- Dike J., *User Mode Linux(R)*, Bruce Perens' Open Source Series, Prentice Hall PTR, 2006.
- Dike J., « User Mode Linux », , <http://user-mode-linux.sourceforge.net/>, 2007.
- Knopper K., « Knoppix », , <http://www.knoppix.com/>, n.d.
- Net, « NetKit », , <http://www.netkit.org/>, n.d.
- Rankin K., Knopper K., *Knoppix Hacks*, Editions O'Reilly, 2004.
- Stevens W. R., *TCP/IP Illustrated : The Protocols*, Addison-Wesley Professional, 1993.
- Stevens W. R., Rago S. A., *Advanced Programming in the UNIX(R) Environment (2nd Edition)*, Addison-Wesley Professional, 2005.
- Tanenbaum A., *Modern Operating Systems (2nd Edition)*, Prentice Hall, 2001.
- Tanenbaum A. S., *Computer Networks, Fourth Edition*, Prentice Hall PTR, 2002.

12 Environnements Informatiques pour l'apprentissage Humain, Lausanne 2007

VNU, « VN User Mode Linux », , <http://jungla.dit.upm.es/vnuml/>, n.d.

Xen, « Xen », , <http://www.cl.cam.ac.uk/research/srg/netos/xen/>, 2006.