

Applets en ligne pour la formation : du filtre au multiplexage par codes orthogonaux.

Yves Moreau

Résumé—Au-delà de l'affichage de texte ou d'hypertexte, d'images, d'informations interactives, les outils internet offrent, en particulier pour la formation, des animations video enregistrées ou dessinées (Macromedia flash, SVG...), des animations calculées (Maple), mais aussi des animations interactives : de véritables simulations sont effectuées sur l'ordinateur de l'utilisateur après téléchargement, de façon transparente pour l'utilisateur par la simple utilisation d'un navigateur (Internet Explorer, Firefox, Mozilla...).

Nous nous intéressons ici aux applications interactives qui peuvent impliquer des calculs relativement importants, ce que permettent les petites applications (« applets ») écrites en langage java. Quelques applets sont présentées ici dans différents domaines des télécommunications : traitement du signal, ADSL, multiplexage, optique. Ces applets ont été et sont utilisées en situation pédagogique sous deux formes : d'une part, la démonstration de cours, et d'autre part l'expérimentation virtuelle en travaux dirigés et/ou pratiques.

I. INTRODUCTION

L'explosion d'Internet a été soutenue et accompagnée d'outils permettant l'affichage passif de textes et/ou de dessins, voire de séquences sonores ou visuelles. Pour la formation, la consultation en ligne de documents pédagogiques résout les problèmes de mise à jour, ainsi que les problèmes logistiques et financiers de la distribution des photocopies. Les possibilités de liens associés (hypertextes, « bulles ») sont tout à fait adaptées à une "consommation" personnalisée des explications: voir par exemple le logiciel de gestion de contenu pédagogique EADGEN développé à l'université de Montpellier [1].

On trouve sur internet de nombreux "tutoriels" tirant parti de cette souplesse, dans les domaines proches de l'internet (informatique, techniques multimédia) mais aussi dans beaucoup d'autres. Internet est de plus adapté à la construction de réseaux thématiques organisant et regroupant des documents qui n'apparaissent plus comme des documents isolés mais comme un contenu complet mis à la disposition d'une communauté pédagogique[2].

Au sein des situations pédagogiques variées de l'apprentissage à distance[3]: Télé-cours (video conférence), Télé TD (classe virtuelle interactive), Télé TP (ressources lourdes partagées), autoformation (Intranet Pédagogique), Téléprojet (Systèmes coopératifs), Jeux de rôle (e-learning), les nouvelles technologies de l'informations et de la

communication (T.I.C.) peuvent être présentes comme support partout. Nous présentons ici plusieurs exemples que nous avons développés, exploitant les possibilités actuelles offertes par les outils de l'Internet, mais qui peuvent être utilisés en dehors de l'internet, là aussi dans la plupart des situations pédagogiques (cours, TD, TP).

Ces applications logicielles pour la formation complètent les applications "administratives" de l'enseignement telles que la consultation de bases de données pour les emplois du temps, la gestion des comptes, les questionnaires à choix multiple (Q.C.M.) et la consultation des notes: nous avons développé un ensemble de "scripts php" qui génèrent dynamiquement un affichage de type internet (html) des notes, moyennes, statistiques etc.... à partir d'une base de données MySQL en ligne, voir demo complète sur [4], et présentation d'une variante[5].

Des examens en ligne peuvent aussi être conçus sur la base de scripts demandant des réponses simples à des questions.

II. DE L'AFFICHAGE AVEC ANIMATIONS A LA SIMULATION

La production de contenus des sites Internet utilisant des logiciels universels (DreamWeaver...), mais aussi des logiciels scientifiques (séquences animées de Maple par exemple) peut déboucher sur du contenu vivant et adapté à la pédagogie. La quantité de données transmises peut être cependant un frein au développement de ce type de contenu. Une approche intéressante est l'emploi de moteurs capables de reconstituer à distance (chez l'utilisateur) des séquences animées (par exemple Macromedia Flash). L'écriture de telles animations nécessitent peu de connaissance en programmation, en revanche les possibilités restent limitées à la visualisation accompagnées de quelques choix de scénarios par l'utilisateur.

La plupart des outils (lecture et "moteurs") qui permettent la consultation de ces éléments sont gratuits, voire intégrés dans les systèmes d'exploitation, ce qui permet une diffusion large et répondant à un fonctionnement standardisé que tout utilisateur (ici l'enseigné) connaît. En revanche, la conception nécessite souvent des outils payants (Acrobat writer, Helix Real Video Producer, DreamWeaver ...), elle est évidemment plus difficile (l'enseignant doit-il acquérir des compétences multimédia? Doit-il travailler avec des experts externes?).

Il est aussi concevable de développer des scripts qui effectuent en ligne des simulations de type scientifique, si les

ressources de calcul nécessaires ne sont pas trop importantes. Dans ce cas, contrairement au javascript et aux simulations présentées dans les paragraphes suivants, les calculs sont effectués sur le serveur et non chez le "client" (étudiant consultant).

Si les calculs sont trop importants, une exécution à base d'interprétations de script n'est plus possible, le langage Java (différent du Javascript) est un véritable langage de programmation et nous a permis de développer des applications (« applets ») comparables à ce que l'on peut écrire en C++ mais qui peuvent être exécutées localement grâce à un simple navigateur du type Internet explorer, Firefox, Mozilla pourvu (c'est le cas général) d'une "machine virtuelle java".

III. DES APPLETS JAVA POUR L'ILLUSTRATION DE CONCEPTS

Nous continuons, dans ce cadre [6][7] à développer des logiciels pour expliquer visuellement les notions nécessaires à la compréhension des techniques modernes utilisées en télécommunications.

A. La notion de fréquence

L'applet¹ présente une "machine hydraulique" où le niveau d'un premier réservoir peut varier sinusoidalement à une vitesse choisie par "l'expérimentateur", le réservoir de gauche sur la figure 1. Un deuxième réservoir communique avec le premier grâce à un tuyau à débit limité, son niveau tente de suivre le premier. On peut observer que les variations de niveau du second réservoir n'ont pas la même amplitude, et ceci d'autant plus que le mouvement est rapide (la vitesse est ajustable). De plus un retard (déphasage) apparaît. Le niveau du second réservoir est le résultat d'une équation différentielle analogue à la loi d'Ohm : débit (i.e. courant) fonction de l'écart des niveaux (i.e. différence de potentiels), lui-même fonction du débit. Cette équation différentielle est résolue numériquement en temps réel. On pourra par exemple tracer le diagramme de Bode (amplitude et déphasage fonction de la fréquence) pour cette machine en percevant concrètement pourquoi l'amplitude est limitée à haute fréquence (très courant dans la nature), ou pourquoi un retard apparaît dans le mouvement élémentaire sinusoïdal, et comment ceci se traduit pour un signal plus complexe : signal carré ou signal triangulaire que l'on peut aussi expérimenter (voir figure 1). Cette applet devrait faire comprendre le mécanisme du filtrage passe-bas grâce à des phénomènes plus tangibles (concrets) que ce que l'on connaît en électronique du type charge et décharge de condensateur.

On reprend d'ailleurs ici l'analogie que les physiciens du dix-neuvième siècle utilisaient vraisemblablement, d'après les termes qu'ils ont choisis : résistance, capacité, courant... Cette approche par analogie ("découverte métaphorique") est importante dans l'enseignement traditionnel, mais elle apparaît encore plus importante dans ce type d'enseignement

fondé sur des simulations visuelles: le concepteur doit trouver les images et métaphores adaptées au vecteur utilisé².

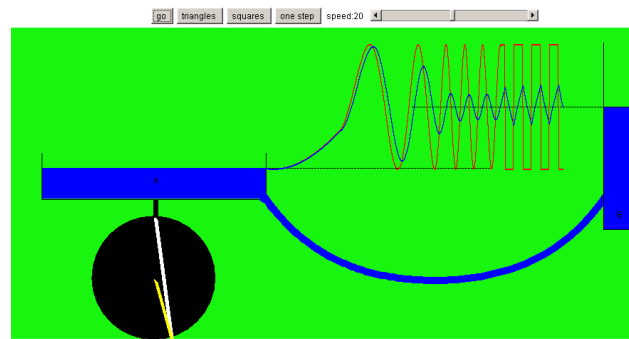


Fig. 1. "Machine" hydraulique pour enseigner le concept de fréquence: la variation de niveau à gauche est transmise à droite avec retard et atténuation en fonction de la vitesse

B. Analyse et synthèse de Fourier

La traditionnelle décomposition et synthèse de Fourier³ a été reprise, agrémentée dans notre applet d'une synthèse sonore illustrant ici aussi la terminologie : harmoniques, octave etc. L'utilisateur peut lui-même essayer de composer les harmoniques de façon à reconstituer un signal par exemple carré, ou demander à l'ordinateur de les calculer. Il peut les modifier, les supprimer et/ou les entendre... La décomposition est celle des électroniciens : amplitude et phase, plutôt que celle des mathématiciens : cosinus et sinus ou parties réelles et imaginaires. Il est possible pour un utilisateur d'effectuer de réelles simulations de façon très simple, ou tout au moins avec une mise en oeuvre standardisée (celle de la navigation sur internet). L'intendance que réclame l'utilisation d'un logiciel de calcul scientifique, et qui constitue souvent un écran entre l'étudiant et le contenu à étudier, est éliminée.

C. Transmissions ADSL

L'enseignement de techniques modernes de télécommunications peut encore illustrer le type de démonstration vivante que peuvent offrir les applets. Après une familiarisation avec la décomposition et la synthèse de Fourier (cf. ci-dessus), l'étudiant pourra expérimenter la modulation en quadrature Q.A.M. très utilisée, par exemple par les modems téléphoniques. La figure 2 montre le signal QAM construit par l'applet jADSL⁴ (menu <one channel> et bouton <transmit>) sur l'écran du navigateur). Un texte quelconque de l'utilisateur est codé en ASCII: les premiers bits constituent un niveau d'amplitude qui module une cosinusoïde tandis que les bits suivants modulent une sinusoïde. On peut noter à cette occasion que les cosinus et sinus ne sont pas porteurs d'information en même temps au

² Dans cette applet, une autre simulation (beaucoup plus difficile du point de vue calcul!) est effectuée: Le profil du tuyau suit le mouvement, il est régi par une équation différentielle non linéaire qui est celle aussi des fils de cuivre entre poteaux de téléphone!

³ <http://www.ies.univ-montp2.fr/~moreau/jFourier>

⁴ <http://www.ies.univ-montp2.fr/~moreau/jADSL>

¹ <http://www.ies.univ-montp2.fr/~moreau/machine>

cours de la période, ce qui permet de transmettre deux informations en partage temporel implicite. Cette technique est largement utilisée : chrominance des systèmes NTSC et PAL en télévision par exemple. La fenêtre de réception (bouton <receiver>) fait apparaître le décodage en sortie : amplitude de la cosinusoïde, amplitude de la sinusoïde et puissance spectrale ainsi que les bits restitués et le texte. Les calculs sont effectués par corrélation : mesure de l'importance d'une composante = intégrale (dite de recouvrement) du signal multiplié par cette composante de base.

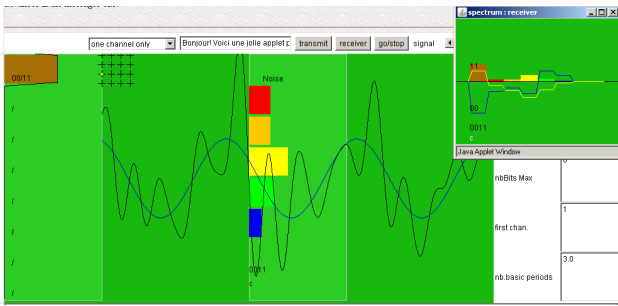


Fig. 2. Transmission QAM sur un canal avec bruit, non perturbateur, sur d'autres bandes spectrales. En haut, la fenêtre de réception : les composantes sinusoïdales et cosinusoïdales à la fréquence de la bande utilisée, sont analysées, les niveaux d'amplitude des composantes, traduits en binaire sont les bits transmis.

On peut simuler la présence de bruit dans le canal, en ajoutant plus ou moins de bruit (contrôlé à la souris) dans la bande de fréquence concernée et/ou dans une autre bande. On expérimente ainsi l'effet sur le signal et sur la réception.

La démonstration peut être étendue à la modulation multiporteuses avec plusieurs (ajustable) canaux en parallèle (ici huit au lieu des 256 de la norme ADSL!) caractérisés chacun

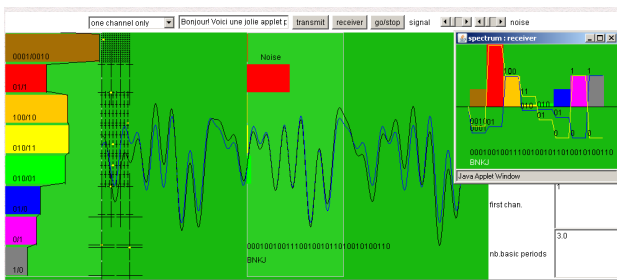


Fig. 3. Transmission parallèle QAM (type ADSL) sur huit canaux avec bruit : la réduction du nombre de bits transmis sur les canaux particulièrement bruité (ici le deuxième) rétablit une transmission correcte.

par une fréquence porteuse multiple d'une fréquence de base (ADSL:4,125 kHz) (Figure 3). Les premiers multiples ne sont pas utilisés dans la norme pour laisser libre la bande téléphonique usuelle (POTS).

Le signal ADSL est affiché lors de sa construction par modulation d'amplitude en quadrature (QAM). La fenêtre de réception analyse le signal bruité transmis et reconstitue le flot de bits donc le texte, par une analyse parallèle sur tous les canaux, en fait une transformée de Fourier rapide.

L'expérimentateur peut introduire (à l'aide de la souris) du

bruit sur certains canaux (simulant une perturbation) entraînant quelques erreurs au niveau de la réception. L'expérimentateur peut réduire (à la souris) le nombre de bits transmis sur le canal perturbé pour restaurer une transmission sans erreur (au prix d'une réduction du nombre de bits transmis, donc d'un débit binaire plus faible).

Cette applet a connu une utilisation en "expérience de cours" en premier cycle et troisième cycle.

D. Multiplexage par codes (CDMA)

Le CDMA (Code Division Multiple Access) est une technique de multiplexage[8] fondée sur des codes (séquences binaires) dits « orthogonaux » ou « quasi



Fig.4: Transmission CDMA, allure et spectre du signal multiplexé (coin haut-gauche), du signal originel et codé d'un utilisateur (coin haut-droit).

orthogonaux » attribués à chaque utilisateur. Les messages codés (remplacement d'un « 1 » par la séquence binaire, et d'un « 0 » par la séquence complémentaire) sont ensuite mélangés (ajoutés). A l'autre extrémité, la connaissance du code permet d'extraire par corrélation le message correspondant.

L'applet jCDMA⁵ est une approche didactique de cette technique: L'utilisateur peut générer des codes selon plusieurs algorithmes, lancer une séquence d'émission simultanées de plusieurs utilisateurs et décoder un des messages. Le logiciel permet d'évaluer l'orthogonalité (l'intercorrélation), afficher les statistiques du signal multiplexé (qui devrait se rapprocher d'un bruit « AWG »: distribution gaussienne en amplitude et uniforme en fréquences).

E. Simulations en optique pour les télécommunications

A côté des applets précédentes, plutôt utilisées en illustration de cours, plusieurs logiciels sont disponibles pour l'étude des circuits optiques[9] (thématique de recherche de l'auteur), et utilisées en travaux pratiques.

L'applet jModes⁶ calcule en fonction des dimensions et des indices, les modes d'un guide (fibre ou guide quelconque) par résolution d'un système aux valeurs propres qui peut atteindre le millier d'équations. L'applet jWDM⁷

⁵ <http://www.ies.univ-montp2.fr/~moreau/jCDMA>

⁶ <http://www.ies.univ-montp2.fr/~moreau/jModes>

⁷ <http://www.ies.univ-montp2.fr/~moreau/jWDM>

simule et enchaîne les propagations selon une approche modale de faisceaux optiques dans une suite de guides grâce à une technique de scripts. On peut ainsi concevoir un circuit de type démultiplexeur en longueurs d'onde (WDM). Un autre logiciel permet de simuler, par résolution parallèle de centaines d'équations aux différences, la propagation optique dans un circuit optique quelconque (JBPM⁸).

La simulation permet d'évaluer le rôle des différents paramètres. Une expérimentation virtuelle (analogue à une expérience de travaux pratiques) peut ainsi être effectuée. Les ressources de calcul sont pour l'instant incompatibles avec l'utilisation de logiciels scientifiques non dédiés

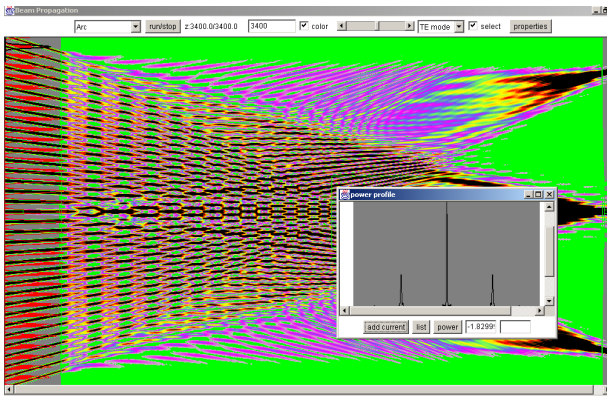


Fig.5: Démultiplexeur en longueur d'onde (PHASAR-WDM): les guides à gauche injectent des faisceaux qui convergent à droite en un point fonction de la longueur d'onde (Simulation BPM)

(Matlab, Maple, Mathematica), le choix d'une approche java est ici parfaitement justifié.

F. Autres applets développées

D'autres simulations sont accessibles sur le site Internet pour la présentation d'autres techniques, ou pour l'expérimentation pratique : la convolution, et en complément de la compression RLE [10], la compression par composantes sinusoïdales (type jpeg) ou par ondelettes⁹. L'approche est beaucoup plus facile pour l'étudiant avec ce

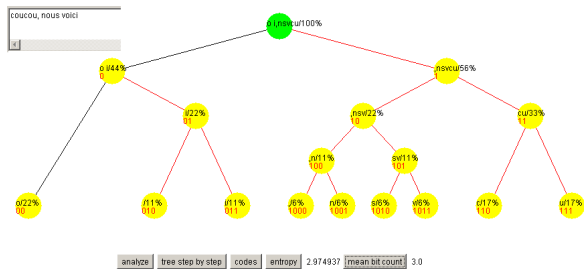


Fig.6: Arbre d'Huffman utilisé pour la compression statistique sans perte ; chaque symbole est codé avec un nombre de bits fonction de sa fréquence d'apparition.

type d'illustration. L'applet jHuffman¹⁰ (compression statistique[11]) illustre l'aspect « mise en scène » au niveau de l'écriture de l'applet : l'arbre d'Huffman (figure 6) est calculé en fait dès que les données à compresser sont saisies, mais il est affiché pas à pas.

IV. DEVELOPPER DES APPLETS DIDACTIQUES

Les applets Java (une douzaine) que nous avons développées sont utilisées pour certaines, comme démonstration-expérience en support de cours, et pour d'autres comme expérimentations virtuelles. Leur implantation sur le réseau permet aussi aux étudiants ou internautes intéressés, de les reprendre dans d'autres environnements.

Les démonstrations à l'aide d'applets Java constituent un outil adapté qui complète les explications orales de l'enseignant lors des cours ; ces dernières peuvent être reportées sur pages HTML pour former un cours complet à distance!

La maturation du logiciel oblige l'enseignant à réfléchir sur la communication pédagogique à effectuer, probablement beaucoup plus que lors de la préparation d'un enseignement traditionnel.

Le langage évolué associé¹¹, orienté objet, reprend pratiquement les possibilités et les avantages du C++ et permet de façon analogue à celui-ci le calcul scientifique avec résolutions numériques d'équations etc. Java intègre aussi les outils d'interfaçage homme-machine maintenant traditionnels tels que fenêtres, boutons, menus ...

Le chargement du code compilé java ("applet") est la seule information transmise depuis le site (de l'ordre de quelques dizaines de Kilo-octets). L'interprétation du code et l'exécution du programme sont effectuées localement de façon transparente sur l'ordinateur de l'utilisateur consultant le site à l'aide de son navigateur internet. Si les applications à base d'animations et/ou de consultations de bases de données sont nombreuses, il existe à notre connaissance peu d'applications Java tournées vers le calcul scientifique. L'intérêt pédagogique est lié à quatre aspects :

- programmes accessibles par Internet, outil attractif, apprécié et utilisé par les nouvelles générations d'étudiants.
- aspect visuel bien développé, lié à la multiplicité des classes d'objets inclus dans l'environnement Java.
- intégration directe des explications scientifiques : une applet java est habituellement lancée depuis une page d'hypertexte («HTML») tout à fait adaptée aux explications hiérarchisées et renvois vers d'autres rubriques.
- Utilisation gratuite.

D'autres avantages peuvent être mentionnés comme la mise à jour aisée des programmes, et la possibilité d'une exécution sur des machines différentes (PC sous Windows, PC sous Linux, MacIntosh, station SUN etc.) La rapidité

⁸ <http://www.ies.univ-montp2.fr/~moreau/jBPM>

⁹ <http://www.ies.univ-montp2.fr/~moreau/jWavelet>

¹⁰ <http://www.ies.univ-montp2.fr/~moreau/jHuffman>

¹¹ <http://java.sun.com>

d'exécution est maintenant voisine de celle de programmes écrits en langage C ou C++, essentiellement depuis l'apparition de nouvelles techniques logicielles: compilation du code à la première utilisation lors d'une session (compilation Just In Time).

Le tableau I issu d'un article de JC Schatzman [12] démontre la rapidité de java avec compilateur JIT, par rapport au C et au Fortran sur un tri (Quicksort) de 1 048 576 nombres en format flottant 64 bits. L'avantage de C++ n'est que de l'ordre de 15%.

TABLE I
COMPARAISONS JAVA, C++ ET FORTRAN

Langage/code	Pentium III 1.33 GHz	Athlon 1G Hz
Java - Interpreted	5.83 sec	5.18 sec
Java-Client	0.897	0.541
Hotspot JIT		
Java-Server	0.921	0.574
Hotspot JIT		
C++	0.800	0.402
FORTRAN	0.820	0.572

Durées d'exécution de calculs de tri, selon le langage de programmation utilisé.

Nous démontrons aussi une méthodologie de programmation fondée sur l'approche objet qui convient au développement relativement rapide de telles applications : réutilisation de "méthodes" adaptées aux calculs scientifiques et à leur présentations... Chaque simulation est caractérisée par une boucle infinie où après l'initialisation d'un ensemble de données, l'applet lance un calcul, affiche les conséquences du calcul, attend la modification de données...La classe Data peut rassembler un grand nombre de méthodes réutilisables : la saisie de paramètres, le lancement d'un "thread d'animation" etc.

V. EVOLUTION DU ROLE DE L'ENSEIGNANT

Une grande interrogation accompagne ces démarches : qui va concevoir, qui va développer le contenu, sachant que selon le type de produit, des compétences sont nécessaires:

- en conception de contenus médiatisables (sens de la métaphore...)
- en scénariste capable d'anticiper les réactions d'un auditoire non présent
- en communication, différentes de celles nécessaires pour un cours traditionnel,
- en présentation assistée par ordinateur (conception de site),
- en écriture de scripts et de programmes,
- en développement d'applications.
- en gestion des ressources (video, son etc..)

- en gestion de travail d'équipe pluridisciplinaire.

L'enseignant est traditionnellement un homme orchestre qui gère en temps réel un travail de documentaliste, concepteur de contenus, producteurs de transparents et polycopiés, animateur de groupe et validateurs d'acquis. L'enseignant, compte tenu de l'apparition de ces outils, devient un concepteur/auteur, un scénariste qui prévoit les réactions de l'auditoire, un producteur qui gère un ensemble de moyens, un animateur-formateur où la dimension temporelle a complètement évoluée : la préparation est beaucoup plus importante et devient comparable à la production télévisuelle (11 minutes effectives réalisées par jour, dit-on, de tournage pour une émission de télévision).

Ceci est particulièrement marqué dans le cas du développement d'applets didactiques telles que celles présentées ci-dessus. Même s'il est envisageable que certains enseignants se spécialisent, un cours de plusieurs dizaines d'heures ne pourra être préparé par une seule personne, et nécessite une organisation par équipe avec éventuellement parties sous-traitées à des sociétés commerciales¹².

Nous n'avons pas abordé ici la validation des acquis, elle a un double rôle : une évaluation de la qualité de la transmission du savoir (évaluation émetteur), et une évaluation des connaissances acquises par l'étudiant toujours nécessaire (évaluation récepteur).

Le premier rôle peut être assigné aux e-mails entre l'enseignant et les enseignés ("hot line" en parallèle à un échange entre enseignés en dehors de tout contrôle mais qui s'est toujours avéré très efficace!). Le second rôle peut se traduire par l'emploi de questionnaires en ligne, mais d'autres formes peuvent être imaginées.

VI. CONCLUSION

Bien qu'un grand nombre de questions restent aujourd'hui ouvertes au niveau de la logistique de production, la pédagogie par l'utilisation d'applets didactiques devrait se développer tant en enseignement à distance qu'en utilisation intranet ou locale où elle peut être intégrée dans les trois formes traditionnelles : cours, travaux dirigés, travaux pratiques. L'intérêt pédagogique de la simulation et de la visualisation grâce à des applets est démontré, il est lié à de nombreux avantages :

- Aspect visuel important,
- Interactivité, gestion temporelle adaptée (processus accéléré (géologie ?) ou ralenti (électronique)).
- Simulations véritablement fondées sur une modélisation, rapides, et qui n'est possible que grâce à la rapidité de l'exécution, voisine de programmes écrits en C.
- Consultations sur Internet, outil attractif, apprécié, utilisé et intégré par les générations récentes d'étudiants.
- Applicable à de nombreux domaines.

Nous ne saurions trop encourager les enseignants à

¹² La société EngNet diffuse et commercialise des applets à usage didactique en micro-onde et optique : <http://www.imodelit.com>

développer ce type d'approche à titre ponctuel et informel, mais cette approche ne trouvera un rythme efficace que si les institutions savent inciter les enseignants producteurs à travailler dans ce sens, et mettre en oeuvre la logistique nécessaire sans se réfugier dans le développement d'organisations hiérarchisées: Internet est avant tout un instrument décentralisé où la spontanéité créatrice parfois désordonnée plus que l'uniformité organisée, est la règle.

REFERENCES

- [1] M. Nanard, EADGEN <http://www.lirmm.fr/~mnanard/eadgen>, Montpellier.
- [2] M. Robert, J.M. Thiriet, « Développement et évaluation d'outils pédagogiques en EEA dans un contexte Européen », *Journées d'Etudes des Télécommunications*, Nice-Sophia-Antipolis, 24-25 novembre 1999..
- [3] P. Prevot, « Les TICE et la formation à distance », *Journées d'Etudes des Télécommunications*, Lyon 6-7 décembre 2001.
- [4] Y. Moreau <http://www.ies.univ-montp2.fr/~moreau/php/NotesEnLigne>
- [5] P.Pujas, NELLY une suite logicielle d'aide à la direction des études }, *cette conférence*, St Pierre de la Réunion, novembre 2007.
- [6] Y. Moreau, "Expérimentations virtuelles et simulations en ligne de circuits", Communication invitée, *Journée simulations*, Metz, 11-juin-02.
- [7] Y. Moreau, "De véritables simulations accessibles en ligne pour l'enseignement des sciences et techniques l'applet learning", *3ème rencontre Europe Amérique Latine sur la formation*, La Havana, (Cuba), 03-nov-02.
- [8] J. G. Proakis, "Digital Communications", MacGraw-Hill International Edition (2001).
- [9] G.Pille, Y. Moreau, K. Kribich, J.Jabbour, S.Gatti and J. Galy, "From photonic components to optical network: an online simulation of a spectral CDMA system", *European symposion on simulation tools for research and education in optical networks (STREON'05)*, CD Rom ENST Bretagne -5.03, Brest (France), 27 octobre 2005.
- [10] S. Escaig et S. Druon , «Étude de la compression sans pertes RLE et ses limites » *cette conférence*, St Pierre de la Réunion, novembre 2007.
- [11] D.A. Huffman, "A method for the construction of minimum-redundancy codes" (PDF), Proceedings of the I.R.E., sept 1952, pp 1098-1102
- [12] J.C.Schatzman, Writing High Performance Java Code Which Runs as Fast as Fortran, C or C++, *Proc. SPIE*, vol. 4521 p.106, Denver, August 2001.