

Architecture de réseaux appliquée à la visite interactive sur mobile d'un musée

Jean-Michel DOUIN, Stéphane ROVEDAKIS et Anne WEI

Laboratoire CEDRIC

CNAM (Conservatoire National des Arts et Métiers)

292 rue Saint-Martin, 75003 Paris, France. jean-michel.douin@cnam.fr

Résumé—L'arrivée de nouvelles technologies dans les réseaux de communication, permet de concevoir de nouvelles applications mieux adaptées aux besoins culturels et industriels. Dans le contexte de la visite d'un musée, cet article décrit tout d'abord l'architecture du réseau permettant de transporter les informations à très haut débit. Cette architecture de réseaux se base sur les technologies sans fil et optique offrant un haut débit de l'ordre de quelques gigabits par seconde. Ensuite, nous présentons une application de visite interactive suivant un parcours dynamique installée sur un smartphone sous Android. L'implémentation de cette application est basée sur une étude des algorithmes concernés. Cette étude nous a permis de sélectionner l'algorithme NN qui est adapté à un guidage interactif en fonction de critères liés aux souhaits du visiteur.

Mots clés — Visite interactive, développement mobile, architecture réseau à haut débit.

I. INTRODUCTION

Une assistance à la visite d'un musée est traditionnellement effectuée par un guide ou des documents papiers. Ce type de visite guidée est souvent programmé à l'avance de façon statique, sans aucune interaction avec l'utilisateur au cours de la visite. Cependant, les visiteurs demandent de plus en plus un guidage personnalisé et interactif. L'arrivée de nouvelles technologies telles que les réseaux interconnectés et les applications sur mobile permettent de répondre à un tel besoin.

De nos jours, une visite interactive d'un musée pourrait être distinguée en deux catégories : visite virtuelle et visite réelle [1-3]. La visite virtuelle consiste à simuler la visite au musée, souvent à 360 degrés. L'image représentant le musée visité évolue dynamiquement, en interaction avec la demande du visiteur. Quant à la visite réelle, on pourrait distinguer la visite réelle avec ou sans réalité augmentée. Dans notre cas, la visite au musée est une visite réelle avec un parcours dynamique élaboré en fonction de sa demande. L'application mobile doit générer un parcours entre la localisation du visiteur et la prochaine œuvre qu'il souhaite voir. En plus de ces deux critères, s'ajoutent des critères supplémentaires comme par exemple la visite de plusieurs objets, l'application doit indiquer le parcours adapté. En

conséquence, notre application mobile appartient plutôt à la catégorie de visite réelle avec réalité augmentée.

Rappelons que le parcours de visite au musée est souvent indiqué sur les murs des salles ou sur les prospectus papiers distribués au début de la visite. Cependant, nous constatons que certains visiteurs ne suivent pas forcément le parcours indiqué pour diverses raisons (par exemple, pour admirer une œuvre qui est en dehors du parcours) ou aimerait suivre un parcours de visite personnalisé prenant en compte leurs centres d'intérêts, mais aussi d'autres critères comme le temps maximum de visite ou le fait que le visiteur soit à mobilité réduite. Le but de notre application est donc de proposer un parcours dynamique qui puisse s'adapter en fonction de la position actuelle du visiteur et de la destination (une œuvre ou un groupe d'œuvres) répondant aux souhaits du visiteur. D'autre part, l'application peut proposer à tout moment un nouveau parcours si le visiteur modifie ses centres d'intérêts ou emprunte un chemin différent de celui proposé. Pour réaliser cela, il sera nécessaire de pouvoir localiser le visiteur au sein du musée. Dans ce contexte, l'application doit d'abord obtenir un certain nombre d'informations de la part du visiteur avant de pouvoir proposer un parcours de visite. À l'aide de ces informations, l'application propose un parcours de visite comprenant un ensemble d'œuvres exposées au musée susceptibles d'intéresser le visiteur. Tout au long de sa visite, le visiteur pourra télécharger et visualiser grâce à l'application une description pour chaque œuvre, ainsi qu'accéder à du contenu supplémentaire en lien avec l'œuvre. À cette fin, l'application s'appuie sur une infrastructure réseau garantissant un haut débit de transfert d'information et permettant d'accéder à du contenu audio et vidéo de haute qualité. Cette infrastructure doit nécessairement allier différentes technologies réseaux permettant d'atteindre des débits de transfert d'informations élevés tout en tenant compte de la mobilité des visiteurs dans le musée. Pour respecter ces deux contraintes, l'infrastructure choisie est composée de communications sans fils avec les visiteurs basée sur la nouvelle norme Wifi IEEE 802.11ac et des communications optiques pour transférer l'ensemble des informations entre les visiteurs et le serveur de contenus du musée.

La suite de cet article est organisée comme suit. La section suivante présente les caractéristiques de

l'infrastructure réseau considéré et déployé dans le musée. La section III détaille la modélisation de l'environnement et la méthode suivie pour calculer le parcours de visite proposé par l'application au visiteur. Les détails concernant l'architecture logique, l'interface Humain-Machine et la mise en œuvre de l'application mobile de guidage sont décrits en section IV. Enfin, nous concluons notre étude et évoquons quelques perspectives en section V.

II. INFRASTRUCTURE DU RESEAU

Dans notre projet, le réseau utilisé se compose de deux parties principales : un réseau sans fil et un réseau optique. Comme décrit précédemment, l'objectif de cette infrastructure est d'atteindre un débit élevé afin de pouvoir transmettre du contenu multimédia de haute qualité, comme par exemple des vidéos HD en « streaming ».

Pour la partie sans fil, plusieurs nouvelles technologies sont en concurrence. Nous pouvons citer le standard WiGig/WiFi qui offre un débit jusqu'à 7Gb/s et la technologie UWB (Ultra WideBand) sur une bande passante supérieure à 500 MHz fournissant un débit jusqu'à 480 Mb/s [4-5]. D'autre part, les technologies de fibre optique évoluent également très rapidement depuis une dizaine d'années. Le débit maximum peut atteindre jusqu'à 400 Gb/s [6]. De nos jours, la technologie RoF (Radio over Fiber) permet l'interconnexion de réseaux sans fil à un réseau optique. Ainsi, il est possible de transmettre sur fibres optiques des signaux électriques complexes suivant différents standards, par exemple autorisant la liaison avec des réseaux GSM, UMTS, Wifi ou satellites.

L'architecture du réseau retenu pour notre projet est illustrée par la Figure 1, dans laquelle le réseau sans fil IEEE 802.11ac et le réseau fibre optique sont interconnectés via un connecteur RoF capable de convertir un signal optique en signal électrique ou un signal électrique en signal optique.

- utilisateur multiple avec faisceaux directionnels,
- bande passante de 80 et de 160 MHz,
- entrées multiples et sorties multiples jusqu'à huit,
- accès au médium EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) renforcé.

Le Tableau 1 ci-dessous fournit une petite comparaison simplifiée des caractéristiques des normes IEEE 802.11n et 802.11ac.

Comme illustré par la Figure 1, un connecteur RoF peut se connecter à plusieurs routeurs WiFi et chaque routeur WiFi peut se connecter à plusieurs bornes WiFi. Chaque borne forme une cellule de communication sans fil, où les terminaux se connectent au réseau concerné. Comme la connectivité au sein d'un bâtiment dépend de son agencement, nous considérons ici que chaque salle du musée possède une borne permettant la gestion locale pour l'accès au médium. Dans ce cas le mobile du visiteur est connecté au serveur du musée en utilisant le réseau sans fil IEEE 802.11ac à travers le réseau en fibre optique. Grâce au haut débit atteint, le serveur du musée est capable de fournir les contenus multimédia de haute qualité demandés par tous les nombreux usagers.

	IEEE 802.11ac	IEEE 802.11n
Fréquences	5GHz	2,4GHz et 5GHz
Largeur de bande passante	20, 40, 80MHz (160 MHz en option)	20 et 40MHz
MIMO	de 1 à 8 dans le sens montant, de 1 à 4 dans le sens descendant	de 1 à 4 dans les deux sens
Densité de modulation	256-QAM	64-QAM
Filtre	Filtrage spatial	-
Taux de codage	5/6	5/6

Tableau 1 : Principales caractéristiques des normes IEEE 802.11ac et 802.11n

La technique MIMO (Multi Input Multi Output) consiste à transmettre simultanément plusieurs flux d'information en fonction du nombre d'antennes disponibles. La norme IEEE 802.11ac introduit jusqu'à huit flux maximum dans le sens montant permettant ainsi d'augmenter le débit.

III. CALCUL ET CHOIX DE PARCOURS DE VISITE

Nous faisons l'hypothèse que chaque visiteur est équipé d'un «smartphone» connecté au réseau local du musée et possédant une application dédiée au guidage du visiteur (présentée à la section suivante) tout au long de sa visite au musée. Nous nous intéressons dans cette section au calcul d'un parcours de visite à proposer au visiteur pour voir un ensemble d'œuvres proposées par le musée et susceptibles de l'intéresser. Pour cela deux étapes sont nécessaires, tout d'abord le visiteur doit entrer un ensemble d'informations pour la sélection des œuvres du parcours, puis dans un second temps un parcours à suivre dans le musée est calculé.

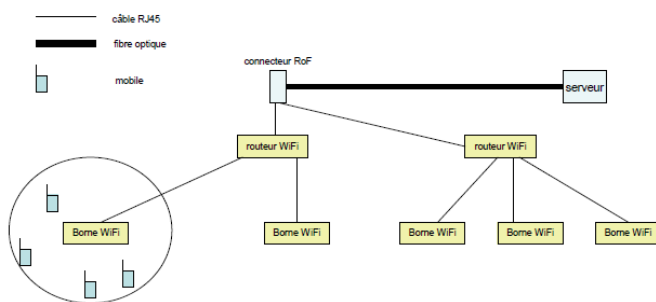


Figure 1 : Architecture globale du réseau

Le routeur WiFi et la borne WiFi communiquent en suivant le standard IEEE 802.11ac permettant d'atteindre un débit théorique allant de 1,3 à 7 Gb/s, contrairement au standard IEEE 802.11n qui permet d'atteindre un débit maximal de 600 Mb/s. Standardisée en 2013, la norme IEEE 802.11ac a dû introduire certaines techniques capables de renforcer la performance du réseau IEEE 802.11n publiées en 2009 [7-8]. Parmi les évolutions nous pouvons citer :

A. Sélection de l'ensemble des œuvres du parcours

Nous considérons que le musée dispose d'un serveur informatique hébergeant une base de données stockant toutes les informations sur les œuvres exposées au musée. Parmi ces informations, nous avons accès, par exemple, à la catégorie ou collection, l'année, l'auteur et son emplacement dans le musée. Afin de sélectionner un ensemble d'œuvres à considérer dans le parcours de visite, l'application demande dans un premier temps au visiteur de répondre à quelques questions avant de commencer sa visite. Par exemple, combien de temps de visite a-t-il à consacrer ? Par quelle collection, époque ou auteur particulier est-t-il intéressé ? Quel âge a-t-il ? Est-ce une personne à mobilité réduite ? Les réponses à ces questions seront envoyées au serveur du musée pour sélectionner un ensemble d'œuvres correspondant à ces critères. Ces œuvres seront ensuite utilisées pour déterminer un parcours de visite qui sera proposé au visiteur.

B. Détermination d'un parcours de visite

Pour pouvoir définir le parcours de visite à proposer, il est avant tout nécessaire de modéliser le musée ainsi que l'ensemble des œuvres exposées. Cela permet dans un second temps, étant donné l'ensemble des œuvres à inclure dans le parcours de visite et leurs positions, de pouvoir déterminer le chemin à suivre pour voir chacune de ces œuvres.

1) Modélisation du musée et des œuvres

Afin de modéliser le musée et les œuvres, nous avons choisi d'utiliser la théorie des graphes. En effet, cette théorie a largement été utilisée dans plusieurs domaines, comme par exemple dans le domaine de l'informatique, de la biologie ou de la chimie, pour la modélisation de problèmes pratiques afin d'élaborer des algorithmes calculant des solutions réalisables. Un *graphe* $G=(V,E,w)$ est composé d'un ensemble de *sommets* V , un ensemble d'*arêtes* E liant ces sommets et une fonction de poids pour chaque arête [13]. Les arêtes du graphe peuvent être orientées (circulation unidirectionnelle) ou non orientées (circulation bidirectionnelle). Par exemple, pour un réseau routier les sommets peuvent représenter les villes, les arêtes les routes possibles entre ces villes et à chaque arête la fonction de poids $w(v_1,v_2)$ retourne la distance de la route directe (v_1,v_2) liant les deux villes v_1 et v_2 . Pour une visite d'un musée, la modélisation des œuvres doit refléter le point de vue que le visiteur peut avoir sur une œuvre donnée. Cela est naturel pour une œuvre pour laquelle la seule façon de pouvoir l'observer est d'être en face de l'œuvre. Cependant, cela n'est pas toujours le cas pour une œuvre en 3 dimensions, qui peut disposer de multiples points de vue dévoilant au visiteur des informations différentes. Ainsi chaque point de vue déterminera une certaine position de l'œuvre dans le musée. De plus, pour calculer un parcours pour le visiteur il est nécessaire de modéliser des *points particuliers* de l'espace du musée donnant accès à une partie du musée, comme par exemple les entrées-sorties de chaque salle, les intersections de couloirs, etc. Ainsi tous ces points (points de vue de chaque œuvre et points particuliers du musée) définiront les sommets du graphe modélisant le musée. Les arêtes du graphe correspondront aux couloirs ou escaliers connectant deux salles voisines, mais aussi entre les œuvres voisines placées

dans une même salle d'exposition. Deux œuvres sont considérées comme voisines dans une salle s'il n'y a pas d'obstacle ou une autre œuvre sur la droite dans le plan entre celles-ci. Enfin, il est nécessaire de définir la fonction de poids w associée aux arêtes du graphe. Par défaut, cette fonction représentera la distance dans le musée entre deux sommets (points de vue ou points particuliers). Cette fonction respecte la propriété d'inégalité triangulaire, puisque nous considérons les distances dans un plan euclidien. La satisfaction de cette propriété simplifie le calcul d'une solution. Cependant, cette fonction peut refléter toute autre information intéressante sur le lien entre deux sommets, comme par exemple le nombre de pas (pour un escalier) entre deux sommets. D'un point de vue informatique, le graphe modélisant le musée peut simplement être stocké sur le serveur en utilisant une matrice d'adjacence, possédant une ligne et une colonne associée à chaque sommet du graphe et l'intersection entre une ligne et une colonne de la matrice stocke le poids de l'arête entre ces deux sommets. Le poids associé au lien entre un sommet vers lui-même dans la matrice a la valeur infinie, car ce lien est inutile à considérer pour notre application.

2) Calcul du chemin à suivre

La dernière phase consiste à calculer sur le serveur le parcours à proposer au visiteur pour voir toutes les œuvres sélectionnées dans les précédentes phases. Étant donné le point de départ du visiteur (accueil du musée, par exemple), nous devons calculer le chemin le plus court passant une fois et une seule par chacune des œuvres sélectionnées. D'un point de vue théorique, cela revient à la résolution du problème du Voyageur de commerce (*TSP – Travelling Salesman Problem*) [14]. Ce problème a initialement été introduit pour répondre au problème du calcul de la route la plus courte permettant de visiter une fois et une seule chaque ville d'une liste donnée. Malheureusement, ce problème est difficile à résoudre. En effet, le problème du Chemin Hamiltonien, réduction du problème du Voyageur de commerce au cas où les arêtes ont un poids unitaire, a été montré comme étant NP-difficile à résoudre [15]. C'est-à-dire qu'il n'est pas possible de trouver une solution optimale en temps polynomial fonction de la taille du graphe. Christofides [16] a proposé un algorithme polynomial permettant de trouver une solution approchée par rapport à la solution optimale pour tout graphe dont les poids des arêtes vérifient l'inégalité triangulaire. Bien que cet algorithme fournit une garantie intéressante, celui-ci nécessite des étapes de calcul intermédiaires réalisant des transformations sur le graphe et qui sont non triviales à implémenter. Il existe un autre algorithme plus simple et calculant une solution approchée pour ce problème, l'algorithme du plus proche voisin (*NN – Nearest Neighbor*). Étant donné un sommet courant dans le graphe, cet algorithme sélectionne à chaque étape le sommet le plus proche non encore visité. L'algorithme démarre à partir du sommet représentant le point de départ et s'arrête lorsqu'il n'y a plus de sommet non visité. Rosenkrantz et al. [17] ont montré que cet algorithme permettait de garantir un facteur d'approximation de $O(\log_2(|V|))$, avec $|V|$ le nombre de sommets du graphe. Cet algorithme doit être appliqué sur un graphe complet $G'=(V',E')$, construit à partir du graphe original G modélisant le musée de la manière suivante. À chaque point de vue d'une

œuvre correspond un sommet dans V' (en incluant deux sommets supplémentaires correspondant au point de départ et de fin pour le visiteur), et il existe une arête entre toute paire de sommets v_1, v_2 dans V' dont le poids est égal à la somme des poids des arêtes constituant un plus court chemin entre v_1 et v_2 dans G . Etant donné une solution S retournée par l'algorithme NN , nous pouvons calculer le parcours final dans le graphe G à proposer au visiteur en projetant pour chaque arête de E' sélectionnée dans la solution S un plus court chemin lui correspondant dans G . Le parcours calculé comme décrit ci-dessus est ensuite envoyé au visiteur sur son «smartphone» afin qu'il puisse commencer sa visite.

3) Adaptation du chemin à suivre

Il est à noter qu'à tout moment le visiteur a le choix de ne pas suivre l'itinéraire calculé par le serveur, car il peut être intéressé par une autre œuvre qui n'a pas été sélectionnée dans le parcours. Nous considérons que l'application peut suivre en temps réel la localisation du visiteur tout au long de sa visite afin de détecter si celui-ci ne suit pas le parcours, ou s'est tout simplement perdu. Lorsqu'une telle situation est détectée par l'application sur le «smartphone» du visiteur, celle-ci réitère la demande de calcul d'un nouveau parcours au serveur en indiquant les œuvres sélectionnées dans le parcours qui ne sont pas encore visitées. Le serveur peut appliquer le même calcul en considérant le point actuel du visiteur comme point de départ, afin de lui proposer un nouvel itinéraire pour continuer sa visite. Ce processus peut aussi être appliqué en considérant le cas où le visiteur désire changer ses centres d'intérêts au cours de sa visite. A tout moment, le visiteur peut accéder au menu lui permettant de modifier les réponses aux questions auxquelles il a répondu avant de commencer sa visite. Cela aura pour effet de recommencer le calcul d'un nouveau parcours de visite en sélectionnant un nouvel ensemble d'œuvres, tout en considérant la position actuelle du visiteur comme point de départ du parcours.

IV. APPLICATION MOBILE DU PARCOURS DE VISITE

A. Description des fonctionnalités

Un prototype sur mobile Android a été développé. Celui-ci permet au visiteur, de sélectionner un parcours qui l'intéresse et en fonction de l'œuvre devant laquelle il se trouve, d'obtenir les informations qu'il souhaite. Le visiteur se voit proposer des variantes de parcours, en fonction de ses centres d'intérêts ou encore, en raison de l'affluence dans certaines salles. La figure 2 montre la première page de l'application dans laquelle le visiteur peut choisir la catégorie des œuvres telle que les transports, la mécanique, etc. Le visiteur bénéficie ainsi d'un guidage assisté et personnalisé à l'intérieur du musée. Bien entendu, l'utilisateur peut décider d'interrompre le parcours initial, et sélectionner un autre parcours ou bien abandonner le parcours actuel pour le reprendre plus tard ou encore décider de flâner comme bon lui semble, l'aide à la visite s'adapte au parcours effectif du visiteur.

Notre application intègre un navigateur web pour l'affichage des informations, une mémorisation des pages

consultées ainsi qu'un serveur web de consultation de ces pages associées à différents outils de statistiques dont certains seront abordés ci-dessous.



Figure 2 : A l'entrée du musée le visiteur a le choix d'un parcours

L'identification du visiteur utilise par défaut le numéro unique de l'appareil et si l'utilisateur le permet, une adresse *mail* peut compléter les identifiants de l'utilisateur. Le visiteur est localisé dans son parcours à l'aide de la technologie iBeacon [9], non présentée dans cet article. Le parcours réel et la présentation des différents documents associés aux œuvres à proximité s'effectue automatiquement au sein du navigateur intégré à notre application. La délivrance des documents pour un visiteur identifié est consignée côté serveur et permettra par la suite à l'administration du musée d'effectuer des statistiques de fréquentation ou de parcours empruntés. Les documents délivrés par le site du musée, au visiteur, sont enregistrés sur le mobile, ils permettront une analyse à posteriori du parcours effectué et également d'obtenir quelques statistiques (voir la figure 3). En somme, le parcours réel du visiteur s'apparente à une navigation sur le serveur web du musée, au clic d'un lien sur une page d'un navigateur, lui correspond un déplacement effectif de l'utilisateur dans une des salles d'exposition. Le téléchargement d'un document s'effectue lors du déplacement du visiteur ou bien à sa demande devant l'œuvre qui l'intéresse.



Figure 3 : Dans cette salle du musée, un document est proposé au visiteur, source : Cnam, musée des arts et métiers

B. Architecture logicielle et Mise en oeuvre

Ces informations sont délivrées au protocole HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) par un serveur web dédié aux visites, les pages téléchargées sont recopiées sur le mobile du visiteur avec la même arborescence que sur le site d'origine

(Voir la figure 5). Pour les médias volumineux en taille, seuls les liens vers le site d'origine sont conservés.

L'arborescence du site web a été déduite de la topologie du musée (Voir la figure 4), ainsi chaque visiteur, par les salles qu'il visite, par les œuvres qu'il consulte, définit un parcours dans le musée, de la même façon qu'une navigation web et son historique de parcours.

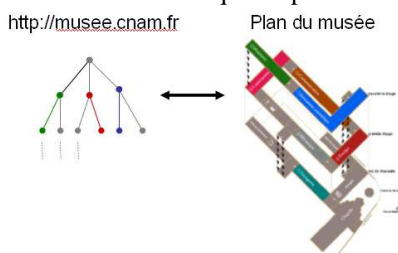


Figure 4 : L'arborescence du site web est déduite du plan du musée

Afin de permettre une lecture sur mobile du parcours effectué, notre application intègre un serveur web. Ce nouveau type de navigation locale permet, de re-visionner la visite sur son mobile ultérieurement au déplacement effectué et d'entamer éventuellement de nouvelles recherches. La superposition de ce parcours effectif avec un plan du musée peut aussi permettre de préparer une nouvelle visite. L'identification par l'enregistrement de son adresse mail, si l'utilisateur l'a permis, autorise une personnalisation des visites par le musée.

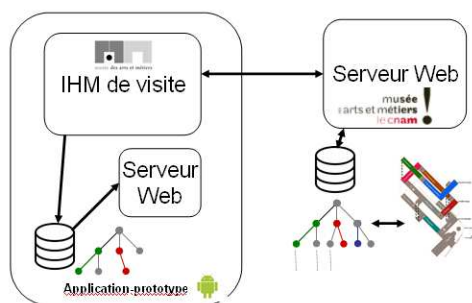


Figure 5 : L'application est constituée d'une IHM de navigation et d'un serveur web

V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cet article présente une architecture de réseaux et une application mobile "parcours interactive" dans le cadre d'une visite dans un musée. L'architecture du réseau à la fois sans fil et optique est décrite dans le but d'atteindre un haut débit permettant aux visiteurs d'accéder aux ressources multimédia. En adaptant les critères liés à un visiteur (à mobilité réduite par exemple), un parcours dynamique susceptible d'intéresser le visiteur est proposé, dont le calcul est basé sur l'algorithme du plus proche voisin qui est bien adaptée à notre application. Cette application montre qu'elle s'adapte aux nouveaux besoins des visiteurs. Le choix de l'algorithme NN et de l'architecture logicielle nous a permis de développer cette application pour mobile.

De nombreux points liés à ce travail engendrent de nouvelles perspectives de développement. Pour l'application

mobile, la technique « WiFi direct » nous permet d'envisager une disponibilité des documents téléchargés sur un mobile d'un visiteur. Si l'utilisateur permet la diffusion de ses documents à d'autres mobiles d'autres visiteurs, cette technique [10] peut permettre de réduire les demandes faites auprès du serveur central du musée. Le protocole de découverte de services NSD, Network Service Discovery [11] pourrait être utilisé à cette fin. La notification asynchrone d'une variante d'un parcours en cours de visite pourrait utiliser le service de *notification push*, nommé « Google Cloud Messaging » [12]. De nouvelles mesures devront être faites en fonction du nombre de visiteurs, de l'affluence dans certaines salles, des parcours effectués, des propositions de parcours faites. Quant à la récolte des données, le cumul de tous les parcours choisis par les visiteurs représente une source d'informations intéressante pour l'administration d'un musée.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le Pr C. Picouleau du Cnam pour les discussions sur la modélisation et le choix de l'algorithme présentés en section III. Ce travail a été rendu possible grâce au financement lié au projet CONDOR (CONtribution à la Diffusion de l'histOIRE du traitement de l'information).

REFERENCES

- [1] S. leleu-Merviel et K. Kounakou, «Muséo: un visio-guide interactif à l'épreuve», *Revue des Interactions Humaines Médiatisées*, Vol. 12, pp. 25-65, 2011.
- [2] Y. Laurillau et F. Paternò, «CoCicero : un Système Interactif pour la Visite Collaborative de Musée sur Support Mobile », *Conférence Francophone IHM'2004*, 8 pages. Namur, Belgique.
- [3] M. Veyret, E. Maisel et J. Tisseau « Guide virtuel autonome immergé dans un environnement réel dynamique », *Revue des sciences et technologies de l'information, Technique et Science Informatiques RSTI-TSI vol.28*, pp. 831-855, 2009
- [4] <http://www.wi-fi.org/>, le site officiel de WiFi
- [5] Standard IEEE 802.15.4a, 2007
- [6] N.Bozinovic, Y.Yue, Y.X Ren, M. Tur, P.Kristensen, H.Huang, A. E. Willner, S. Ramachandran, «Terabit-Scale Orbital Angular Momentum Mode Division Multiplexing in Fibers», *Science*, n°340, 2013
- [7] M-D Dianu, J. Riihijarvi and M. Petrova, « Measurement-Based Study of the Performance of IEEE 802.11ac in an Indoor Environment », *IEEE ICC 2014, Sydney, Australia*, Juin 2014.
- [8] R. Liao, B. Bellalta, J. Barcelo, V. Valls and Miquel Oliver, «Performance analysis of IEEE 802.11ac Wireless backhaul networks in saturated conditions », *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Springer, September 10, 2013
- [9] <http://www.smartbeacon.eu/fr/>, le site de SmartBeacon
- [10] <http://developer.android.com/guide/topics/connectivity/wifi2p.html>, Wi-Fi Peer to Peer, Android developer documentation
- [11] <http://developer.android.com/training/connect-devices-wirelessly/nsd.html>, Using Network Service Discovery, Android developer documentation
- [12] <http://developer.android.com/google/gcm/index.html>, Google Cloud Messaging, Android developer documentation
- [13] C. Berge, *Théorie des graphes et ses applications*, Collection Universitaire de Mathématiques II, Paris: Dunod, 1958.
- [14] D. L. Applegate, R. M. Bixby, V. Chvátal, W.J. Cook, *The Traveling Salesman Problem*, ISBN 0-691-12993-2, 2006.
- [15] M. R. Garey, D. S. Johnson, "A2.3: ND22-24", *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, W.H. Freeman, pp. 211-212, ISBN 0-7167-1045-5, 1979.
- [16] N. Christofides, *Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem*, Technical Report 388, Graduate School of Industrial Administration, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, 1976.
- [17] D. J. Rosenkrantz, R. E. Stearns, P. M. Lewis, "An Analysis of Several Heuristics for the Traveling Salesman Problem", *SIAM Journal on Computing* 6 (5): 563-581, doi:10.1137/0206041, 1977.