

Mobilité : Accès aux Données et Interaction Homme-Machine

Gérôme Canals¹, Laurence Nigay² et Philippe Pucheral³

¹ LORIA

gerome.canals@loria.fr

² Laboratoire CLIPS-IMAG

laurence.nigay@imag.fr

³ PRISM

philippe.pucheral@prism.uvsq.fr

Résumé. La généralisation des réseaux sans fil combinée à la multiplication des terminaux ultra-légers transforme en profondeur les applications informatiques, tant dans leur conception que leur usage. Aussi cet article examine les problèmes nouveaux ou devenus cruciaux par l'introduction de capacité mobile dans les applications informatiques, ceci en abordant deux aspects complémentaires des logiciels : l'accès à des données persistantes et l'interaction homme-machine.

1 INTRODUCTION

La généralisation des réseaux sans fil combinée à la multiplication des terminaux ultra-légers transforme en profondeur les applications informatiques, tant dans leur conception que dans leur usage.

L'infrastructure matérielle et logicielle est déjà disponible ou sur le point de l'être. Tout d'abord, l'accès sans fil à l'internet est maintenant opérationnel, que ce soit grâce à la norme 802.11b (Ethernet sans fil) ou grâce à la téléphonie cellulaire. Par ailleurs, les terminaux ultra-légers se multiplient et deviennent connectables au réseau : assistants personnels, téléphones cellulaires, cartes à puces, systèmes domotiques, systèmes

2 Assises GdR I3 – décembre 2002

embarqués dans l'automobile ou l'avionique, etc. Tous offrent des capacités de calcul, de stockage ou d'interaction en progrès constant.

De nombreuses applications et nouveaux usages avec de tels terminaux devenus mobiles, autonomes et communicants restent à imaginer, déployer et valider. Nous pouvons envisager des applications dans le tourisme [7], la gestion de flottes de véhicules, ou encore des applications dédiées à des professions particulières ayant de nombreuses occasions de déplacement [28] : maintenance sur site, visites/inspections de chantiers, prospections archéologiques [31], support pour des rencontres ou réunions impromptues [20] etc.

Au-delà des nombreux usages à anticiper, ces avancées technologiques affectent la conception même des applications informatiques sur supports mobiles, en particulier dans deux de leurs principaux aspects : l'accès aux données et l'interaction homme-machine. D'une part, ces mutations dans l'infrastructure support amènent des contraintes nouvelles, souvent en opposition avec les solutions éprouvées utilisées jusqu'ici. Ces contraintes portent sur les capacités des terminaux eux-mêmes : performances (rapidité, stockage) inférieures à celles des machines de bureau ou des serveurs, interactivité réduite ou particulière. Elles portent également sur les capacités de communication : débit faible et/ou fluctuant, connexions instables ou épisodiques. D'autre part, des problèmes, qui ne sont pas nécessairement nouveaux, deviennent centraux lors de la conception d'applications sur supports mobiles comme l'asynchronisme des données stockées sur les terminaux mobiles et celles sur un serveur, la prise en compte du contexte d'utilisation (par exemple la localisation de l'utilisateur), et la conception d'applications et en particulier de leurs interfaces-utilisateur pour des plates-formes matérielles variées.

Aussi la mobilité est un vaste domaine de recherche aux facettes variées, des applications sur des assistants personnels que l'utilisateur porte avec lui, aux applications disponibles sur plusieurs plates-formes matérielles différentes pour un utilisateur nomade, en passant par des environnements instrumentés dans lequel l'utilisateur évolue. Toutes ces

facettes de la mobilité peuvent s'inscrire dans un agenda de recherche plus vaste, intitulé informatique pervasive¹ :

la conception d'environnement informatique :

- accessible n'importe où et quel que soit l'environnement social
- utile quelle que soit la tâche à réaliser.

Cet article examine les problèmes nouveaux ou devenus cruciaux par l'introduction de capacité mobile dans les applications informatiques, ceci en abordant deux aspects des logiciels : l'accès à des données persistantes et l'interaction homme-machine. L'article est organisé comme suit. La section 2 présente un environnement matériel et logiciel de référence pour des applications mobiles. La section 3 est consacrée à l'accès aux données et détaille spécialement le problème de la cohérence dans les bases de données mobiles. La Section 4 aborde ensuite les études liées à la conception de l'interaction homme-machine sur supports mobiles. Nous y détaillons en particulier la conception de techniques d'interaction avec des dispositifs aux capacités plus réduites qu'une station de travail ordinaire et des paradigmes d'interaction autre que la manipulation directe comme la réalité augmentée et les interfaces incorporées.

2 ENVIRONNEMENT MATERIEL ET LOGICIEL DES APPLICATIONS MOBILES

L'objectif de cette section est d'introduire les constituants d'un environnement matériel et logiciel typique pour des applications mobiles. Bien que non unique, cet environnement est considéré comme suffisamment représentatif pour servir de référence tout au long de l'article.

Du point de vue matériel, les équipements suivants sont considérés□

Terminaux□ il s'agit de calculateurs légers et mobiles (ordinateur portable, assistant personnel, téléphone cellulaire, carte à puce, ordinateur de bord ...) dotés d'une interface radio leur permettant de se connecter au réseau filaire. Bien qu'à une échelle différente, les caractéristiques de ces

¹ Informatique pervasive tiré du latin per-vadere (se répandre partout). "Ce néologisme semble tout à fait légitime en Français, préférable en tout cas à envahissant, ubiquiste/ubiquitaire ou diffus [30]".

terminaux sont□ capacités de calcul et de stockage réduites, faible autonomie électrique, capacité d'affichage réduite, architecture matérielle ad hoc rendant certains traitements très coûteux, faible fiabilité (risques de perte, vol, destruction).

Serveurs□ il s'agit de calculateurs traditionnels, connectés de façon permanente au réseau filaire et dotés de capacités de traitement et de stockage importantes.

Réseau hertzien□ on considère ici un réseau de communication cellulaire dont les caractéristiques sont□ faible débit, taux d'erreur de transmission élevé, déconnexions accidentelles liées à des passages en zone d'ombre. Par contre, ce médium est bien adapté à la diffusion de messages.

Réseau filaire□ par opposition au réseau hertzien, le réseau filaire est supposé offrir un débit et une qualité de communication élevés.

Du point de vue logiciel, on distingue les entités suivantes□

Clients□ on qualifie de client un logiciel applicatif s'exécutant sur un terminal mobile et interagissant directement, ou indirectement, avec des sources de données présentes sur le réseau filaire.

Source de données□ on regroupe sous cette terminologie le processus serveur et la source de données qu'il gère. Une source de données est capable d'émettre des données en réponse à une requête d'un client.

Proxy client□ il s'agit d'un agent représentant le client sur le réseau filaire. Cette représentation peut prendre plusieurs formes, comme par exemple le masquage de la déconnexion d'un client en enregistrant les messages qui lui sont destinés jusqu'à la prochaine connexion.

Proxy source□ il s'agit d'un agent représentant une source de données sur le terminal du client. Cette représentation a pour objectif de permettre au client d'exécuter des traitements en mode déconnecté, en masquant autant que faire se peut la déconnexion.

3 ACCES AUX DONNEES ET APPLICATIONS MOBILES

3.1 Les dimensions du problème

On peut distinguer différents types d'applications mobiles effectuant des accès à des données persistantes. Il peut s'agir d'applications client-serveur traditionnelles dans lesquels les utilisateurs sont mobiles (ex□ accès au système d'information de l'entreprise par un employé nomade, accès itinérant à des données personnelles hébergées par un *Database Service Provider*). La capacité de diffusion propre aux réseaux hertziens permet également de mettre en place des applications effectuant de la dissémination d'information (météo, trafic routier, cours de la bourse ...) à destination d'un grand nombre de clients mobiles. Inversement, la base de données peut être embarquée sur un mobile et participer à des traitements en mode déconnecté. La capacité de stockage croissante des calculateurs les plus légers (puce électronique) permet d'envisager des applications de type dossier ultra-portable dont certains peuvent en outre bénéficier d'une forte sécurité (ex□ dossier médical sur carte à puce, carnet d'adresse sur carte SIM). Enfin, la gestion de la mobilité introduit des besoins en terme de bases de données de localisation (ex□ localisation de téléphones cellulaires par les opérateurs télécoms, gestion de flottes de véhicules).

En rapprochant les besoins introduits par ces classes d'applications aux contraintes liées à l'architecture logicielle et matérielle présentées en section 2, on peut identifier les dimensions suivantes du problème de la mobilité dans les accès aux données□

Gestion de données spatio-temporelles□ Les bases de localisation ont pour objectif de retrouver rapidement la localisation d'un mobile ou du moins de l'approximer avec une faible marge d'erreur. Cette approximation a un impact fort sur la modélisation des données (i.e., de leur mouvement), sur l'expression des requêtes (ex□ hôtels les plus proches de la position que l'utilisateur aura atteinte dans une heure) et sur leur évaluation efficace (opérateurs et méthodes d'indexation ad hoc).

Modèles d'accès à l'information□ La mobilité nécessite d'envisager de nouveaux modèles d'accès aux données plus souples que le modèle client-serveur. Par exemple, un modèle de souscription permet à un client d'être notifié automatiquement lorsqu'un événement satisfaisant son abonnement est publié. Un modèle de diffusion permet quant à lui à un serveur de diffuser de façon répétitive une information, les clients intéressés se mettant à son écoute. Des modèles basés sur une diffusion épidémique de l'information peuvent être envisagés pour permettre le passage à l'échelle. Ces modèles offrent des avantages du point de vue de la consommation de bande passante et du support de l'asynchronisme lié aux déconnexions.

Synchronisation et cohérence transactionnelle ☐ la mobilité s'accompagne souvent de travail en mode déconnecté. Les mises à jour effectuées dans ce mode conduisent à des divergences de copies entre la version originale (généralement hébergée sur le réseau fixe) et ses différents réplicas (hébergés sur des mobiles). Lors des reconnections, des protocoles complexes de synchronisation/réconciliation doivent être appliqués pour rétablir la convergence des copies. Les plus sophistiqués d'entre eux respectent des règles de causalité et de préservation de l'intention de l'utilisateur. Cependant, certaines applications ont des besoins plus forts de cohérence qui nécessitent le respect des propriétés transactionnelles ACID (Atomicité, Cohérence, Isolation, Durabilité). La mobilité a un impact fort sur la mise en œuvre de chacune de ces propriétés.

Gestion des données embarquées ☐ Concevoir des composants bases de données destinés à être embarqués sur des calculateurs mobiles ultra-légers est un challenge important. En effet, chaque calculateur est architecturé de sorte à satisfaire des propriétés précises (portabilité, autonomie électrique, coût de production, sécurité ...) en tenant compte de contraintes matérielles imposées (taille maximale de la puce, débit de communication contraint, technologie mémoire imposée...).

Confidentialité des données ☐ Afin de rendre les données plus facilement accessibles à des utilisateurs mobiles, il est fréquent de les stocker sur un serveur fixe, par exemple géré par un hébergeur de données sur l'Internet (*Database Service Provider*). Se pose alors le problème de la confidentialité de ces données. Des modèles de sécurité de bout en bout restent à définir afin de résister à tous types d'attaques, y compris celles dirigées vers l'empreinte disque de la base de données, qu'elles soient menées par un intrus ou par l'hébergeur de données lui-même.

Adaptabilité : l'objectif de l'adaptabilité est d'offrir à l'utilisateur, quelle que soit sa localisation et son type de terminal, un service aussi proche que possible de celui fourni dans un contexte fixe. Par exemple, la précision d'un objet téléchargé sur un terminal peut dépendre des capacités d'affichage et de stockage du terminal utilisé ainsi que du temps de connexion nécessaire au téléchargement. Le masquage de la déconnexion à l'utilisateur est également un souci majeur.

Bien que tous ces sujets soient d'égale importance, nous avons pris le parti d'en développer un plus avant plutôt que de donner un aperçu obligatoirement incomplet de tous. La suite de cette section se concentre

donc sur le problème de la cohérence des données, vu sous le double éclairage de la synchronisation et des transactions.

3.2 Le problème de la cohérence

Le problème de la cohérence est central dans les applications de gestion de données. Cependant, les solutions classiques à base d'exclusion mutuelle et de transactions atomiques sont profondément remises en cause par la mobilité. En effet, la mobilité conduit à dupliquer les objets manipulés pour les rendre accessibles efficacement en des lieux multiples et dispersés, ou sur plusieurs terminaux (ordinateur de bureau, assistant personnel, téléphone). Par ailleurs, la perte de connexion, volontaire ou non, entre les éléments gérant ces copies est courante et conduit ces copies à évoluer parfois de façon indépendante. Deux approches complémentaires sont explorées pour apporter une solution à ce problème difficile. La première consiste à adapter des algorithmes de réconciliation de copies divergentes. La seconde consiste à adapter des modèles de transaction.

3.2.1 Algorithmes de réconciliation

Maintenir des copies d'un même objet est une technique courante [17]. Les solutions habituellement mises en œuvre sont basées sur deux approches principales : mise à jour immédiate et en exclusion mutuelle de toutes les copies de l'objet, ou diffusion des mises à jour et intégration dans le même ordre sur tous les sites.

Dans un contexte mobile, ces approches sont inopérantes car elles font l'hypothèse d'une connexion permanente entre les sites. Au contraire, la mobilité nécessite la mise en œuvre de solutions acceptant des déconnexions, parfois longues et/ou imprévues, et donc utilisant la diffusion différée des mises à jour et leur intégration sur des copies ayant divergé.

Des solutions ont déjà été étudiées et mises en œuvre. On trouve par exemple des synchroniseurs de fichiers [3] (ex : *Power Merge*, *Windows File Synchronizer*) et des synchroniseurs de données (ex : *HotSync* de Palm, *SyncML*) dans des outils ou systèmes commerciaux. Cependant, ces outils sont spécifiques à un système ou un type d'objet spécifique (agenda, contacts) et ne travaillent que sur l'état de l'objet sans considérer les opérations réalisées et leur sémantique. Les gestionnaires de

configuration [12], quant à eux, gèrent des versions d'objets qui peuvent diverger et mettent en œuvre des outils de fusion, par exemple *diff3/rcsmmerge*[40], *xmlmerge*[45], ou *FileResolve*[13]. Ces outils ne sont pas fondamentalement différents des synchroniseurs de données et présentent les mêmes avantages et inconvénients.

L'approche la plus prometteuse est sans nul doute celle fondée sur les *algorithmes collaboratifs synchrones*[11,38,42]. Ces algorithmes exploitent la sémantique des opérations effectuées sur des objets typés pour assurer que les historiques d'opérations effectivement exécutées sur chaque copie sont non pas identiques, mais *équivalents*, dans le sens où ils produisent le même état final. Toute opération générée sur une copie est d'abord exécutée localement puis diffusée et intégrée dans les historiques des copies distantes. L'intégration de cette opération est particulière, puisqu'elle se base sur une *transformation* (transposée avant ou arrière [37]) de cette opération pour tenir compte des effets d'autres opérations déjà exécutées localement. Il a de plus été montré que la diffusion d'opérations locales et l'intégration d'opérations distantes peuvent sans problème être différées, de façon à autoriser les périodes de déconnexion.

Les avantages de cette approche sont multiples. Tout d'abord, elle est générique : moyennant la définition des opérations et de leur transposées, l'algorithme est identique quel que soit le type d'objets manipulé. Ensuite, l'algorithme est identique que l'on soit en mode connecté (diffusion/intégration immédiate) ou en mode déconnecté (diffusion/intégration différée), ce qui permet un passage transparent d'un mode à l'autre et autorise entre autre les déconnexions impromptues.

Un certain nombre d'avancées sont cependant nécessaires pour rendre ces algorithmes effectivement utilisables. Elles concernent en premier lieu la robustesse et le passage à l'échelle pour accepter dynamiquement un grand nombre d'utilisateurs et rendre le système fiable. D'autre part, les temps de déconnexion pouvant être longs dans les applications mobiles, il est important de minimiser la taille des historiques pour faciliter leur stockage et leur transfert lors des reconnections. Une piste intéressante consiste à utiliser les mêmes techniques de transposition d'opération pour compresser ces historiques. Enfin, la technique de réconciliation se base sur la transformation d'opérations. Ces transformations résultent de choix arbitraires fait lors de l'écriture de ces transformées. Ceci est acceptable lors de mises à jour immédiates : l'utilisateur en est conscient et peut agir

pour corriger ce choix s'il ne lui convient pas. Dans le cas de mises à jour différées, il peut être intéressant d'impliquer les utilisateurs dans le processus de réconciliation en leur signalant l'existence d'un conflit plutôt que d'appliquer un choix arbitraire qui serait difficile à corriger.

Si ces approches sont efficaces pour assurer la cohérence de copies divergentes, elles sont cependant insuffisantes lorsque les mises à jour concernent plusieurs objets dépendants.

3.2.2 La cohérence transactionnelle

Les mécanismes transactionnels garantissent la cohérence des données en assurant notamment l'atomicité des mises à jour concernant des objets dépendants. Cette atomicité est réalisée d'une part en isolant les transactions les unes des autres, et d'autre part en interdisant les exécutions partielles. Dans le cas des applications mobiles, le mécanisme transactionnel doit de plus assurer l'atomicité de la création des copies d'objets et leur réintégration dans la base. Ceci permet de garantir que les copies obtenues et réintégréées sont cohérentes *entre elles*.

Par ailleurs, les protocoles classiques pour assurer l'isolation et la validation sont incapables de travailler en mode déconnecté. En ce qui concerne la validation, la seule solution est de l'entreprendre lorsque l'unité mobile est connectée de façon fiable. Le problème est que ceci ne correspond pas forcément au moment de terminaison de la transaction.

En ce qui concerne l'isolation, le problème est plus aigu encore. Une première approche, pessimiste, consiste à assurer cette isolation avant toute déconnexion en garantissant à la transaction l'accès exclusif aux données qu'elle manipule (grâce à des verrous par exemple). Le problème posé par cette approche est que la durée de la déconnexion est inconnue, et non bornée, ce qui conduit à bloquer les données réservées pendant un temps qui peut être très long, voire infini. Comment décider alors de leur libération ? Une seconde approche est d'adopter une stratégie optimiste en réglant les problèmes de concurrence uniquement au moment de la validation. Là encore, la durée éventuellement longue de la déconnexion est problématique : la divergence entre les copies peut-être importante. Lors de la validation, on peut choisir d'annuler la transaction, en perdant une quantité importante de travail réalisé par l'utilisateur déconnecté. On peut également fusionner les copies en utilisant les algorithmes présentés ci-dessus, mais cette fusion sera difficile si l'écart est grand.

De nombreux travaux ont été menés pour faire face à ces problèmes. Concernant l'isolation, une des solutions proposées est d'intégrer les approches pessimistes et optimistes en utilisant des *délais de garde* au-delà desquels l'exclusivité d'accès n'est plus garantie [24]. D'autres approches proposent une solution plus globale en se basant sur un "contrat" passé entre la transaction mobile et le système. Ce contrat peut inclure par exemple des règles de cohérence, des méthodes spécifiques et des obligations comme dans les *Compacts* du modèle Promotion [43]. Dans Two-tiers-replication [17], la validation globale consiste à ré-exécuter les transactions mobiles dans l'environnement global. Le contrat consiste en un certain nombre de règles d'acceptation appliquées lorsque le résultat de la ré-exécution diffère de l'exécution déconnectée. Dans Clustering [29], le contrat consiste en des limitations sur le nombre de modifications faites sur les copies déconnectées, afin de borner la divergence et faciliter la réintégration. Enfin, certains travaux reprennent les protocoles existants pour les adapter au contexte de la mobilité. C'est le cas du protocole UCM [5] qui propose un protocole de validation atomique à une seule phase afin de permettre la déconnexion des participants et minimiser le nombre de messages échangés.

Plusieurs problèmes restent très ouverts à l'heure actuelle. Il est tout d'abord nécessaire de concevoir de nouveaux modèles de transaction adaptés à différents contextes ou hypothèses (objets communicants, composants ...). Il faut par ailleurs reconsidérer les protocoles utilisés actuellement pour l'isolation et la validation. Il apparaît également fondamental de construire un cadre de référence pour placer et comparer ces différents modèles et protocoles afin d'explicitier leur apport effectif et de comprendre leurs choix respectifs. Enfin, la fusion de copies reste un des sujets les plus attractifs vis à vis de la mobilité. Les algorithmes actuels fonctionnent objet par objet. Pour les utiliser dans un cadre transactionnel, il faut les étendre pour prendre en compte les dépendances et contraintes d'intégrité liant les objets entre eux.

4 INTERACTION HOMME-MACHINE SUR SUPPORTS MOBILES

4.1 Les dimensions du problème

Organiser dans un espace cohérent de dimensions les études liées à la mobilité des utilisateurs est une entreprise ambitieuse de par la diversité des problèmes traités. La première conférence dédiée à l'interaction sur supports mobiles, Mobile HCI'2002 en septembre 2002, confirme ce constat : nous y trouvons des sessions aux thèmes très divers comme les critères de conception, les nouveaux domaines d'application, les méthodes de conception, les approches d'évaluation ergonomique, etc.

Il convient d'abord de constater que la mobilité des utilisateurs a rendu la conception ergonomique et logicielle des systèmes interactifs plus complexes. Comme souligné dans [27], les dispositifs sans fil et donc la mobilité "a déplacé vers le haut la barre à franchir" pour concevoir des systèmes interactifs utilisables. En effet, le système doit être utilisable dans des environnements physiques et sociales dynamiques. Les approches de conception pour une station de travail fixe et un contexte d'utilisation cerné sont donc à remettre en cause ou du moins à étendre. Aussi une organisation possible de l'espace problème peut se plaquer sur les étapes de conception ergonomique et logicielle d'un système interactif. Ainsi une dimension de l'espace problème concernerait la modélisation du contexte d'utilisation, une autre dimension les critères d'ergonomie comme l'autonomie, le poids, la robustesse de la plate-forme matérielle, une autre dimension les modèles d'architecture logicielle, une autre dimension les outils de développement comme la boîte à outils pour la prise en compte du contexte [9], une autre dimension les techniques d'évaluation ergonomique, etc.

Nous proposons ici une autre organisation de l'espace problème en trois classes qui traduit le développement historique des études menées en Interaction Homme-Machine sur supports mobiles. (1) La première classe, la plus ancienne, regroupe les études liées aux capacités restreintes des dispositifs d'entrée/sortie sur supports mobiles. La convergence des télécoms et de l'informatique a vu l'avènement de nouveaux dispositifs portables communicants : communicants entre eux et communicants avec d'autres systèmes. (2) La communication sans fil a engendré de nouveaux problèmes au niveau de l'interaction : lenteur, délai et rythme de l'interaction non prédictible. A. Dix [10] regroupe ces problèmes sous le terme d'aspect temporel de l'interaction qui devient variable et non prédictible. Plus généralement et outre les aspects temporels de

l'interaction, le fait que les dispositifs portables puissent communiquer a permis d'envisager la conception de collecticiels sur supports mobiles. Ceci constitue notre deuxième classe d'études. (3) Enfin une dernière classe est liée au rôle particulier que joue le contexte dans l'informatique mobile. La nécessité de prendre en compte le contexte dans les systèmes interactifs est devenue une évidence du moment que l'utilisateur n'était plus figé à son bureau mais devenait mobile. Le contexte d'utilisation fait l'objet aujourd'hui de très nombreuses études tant du point de vue de la prise en compte du contexte dans la conception ergonomique que celui de la conception logicielle d'application sensible contexte.

Nous développons la première classe regroupant les études sur les techniques d'interaction dans le paragraphe suivant.

Nous ne détaillons pas les aspects liés à la conception et réalisation de collecticiels sur supports mobiles (deuxième classe d'études). Il convient néanmoins de noter que la mobilité des utilisateurs a remis en cause la classification "espace-temps" des collecticiels [18] reposant sur deux caractéristiques, à savoir où et quand une action est exécutée par un des utilisateurs par rapport aux autres utilisateurs. En effet, il convient de concevoir les collecticiels sur supports mobiles, non par rapport à la distance mais par rapport aux lieux des interactions. Ainsi, l'interaction sera qualifiée de "confinée", si elle se déroule toujours dans les mêmes lieux, pas forcément proches. Elle sera en revanche dite "vagabonde" si elle peut intervenir n'importe où. La distinction confiné-vagabond ne remplace pas la notion initiale de distant-local. Ces deux axes sont orthogonaux. Par exemple, un collecticiel dont l'utilisation est limitée à un bâtiment est confiné. Cependant, à l'intérieur de ce bâtiment, les utilisateurs peuvent être dans la même pièce ou au contraire dispersés dans tout le bâtiment. Par exemple, le système Netman [4] est destiné à des techniciens pour maintenir le réseau de l'Université de l'Oregon □ les techniciens sont confinés au campus, mais ils sont amenés à se disperser dans tous les bâtiments. A l'opposé, le système Hummingbird [19] est de type vagabond, mais les utilisateurs doivent être ensemble : chaque utilisateur d'un groupe donné porte un petit objet, émetteur-récepteur. Ce système permet par exemple à un utilisateur de savoir si quelqu'un de son groupe est dans la même salle que lui.

Nous ne détaillons pas non plus la troisième classe d'études, la prise en compte du contexte, qui nécessiterait un article complet. Plusieurs états de l'art récents sont disponibles :

- Un numéro spécial de la revue HCI [35] consacré aux systèmes interactifs sensibles au contexte dresse un panorama des recherches : nous constatons qu'il n'y a pas une définition consensuelle du terme contexte. De plus plusieurs approches architecturales y sont proposées pour développer des applications sensibles au contexte.
- Focalisant sur un aspect particulier du contexte, la localisation de l'utilisateur, un numéro spécial de la revue IEEE Computer [36] est dédié aux systèmes sensibles à la localisation de l'utilisateur.
- Très récemment, dans [8], un historique des études sur le contexte est présenté et une ontologie du contexte est exposée.

4.2 Interfaces "baby-face" utilisables

De très nombreuses études sont consacrées à la conception de techniques d'interaction pour des plates-formes portables, comme un assistant personnel, aux capacités interactionnelles plus réduites que celles des stations de travail. La taille de l'écran [21, 33, 34] est par exemple un paramètre crucial à prendre en compte pour la conception des techniques d'interaction graphiques en sortie, du système vers l'utilisateur. Dans [23], de telles interfaces reposant sur des écrans de petites tailles sont décrites comme des interfaces "baby-face". Des modalités de sortie autres que graphiques sont aussi conçues : par exemple [44] propose l'usage de sons spatialisés pour parcourir les rendez-vous de la journée en situation mobile. Outre l'interaction en sortie, des études sont dédiées à de nouvelles techniques d'interaction en entrée, de l'utilisateur vers le système, comme un simulateur de clavier qui est composé de bagues que l'utilisateur doit porter [16].

Orthogonalement à ces études qui visent la création de nouvelles techniques d'interaction en entrée comme en sortie, nous avons mené une étude sur les systèmes multimodaux. Il s'agit de systèmes capables de permettre aux utilisateurs d'interagir via l'usage de différentes modalités communicationnelles ou techniques d'interaction (parole, gestes, etc.). L'hypothèse qui sous-tend cette perspective est que de tels systèmes

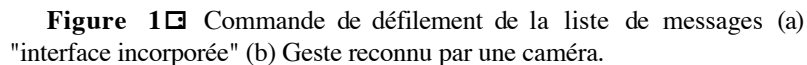
devraient rendre l'interaction homme-machine plus efficace, plus robuste et plus flexible [26]. La situation de mobilité de l'utilisateur implique des contextes d'interaction par définition variables (dans le train, dans la rue, etc.). Il convient alors de laisser le choix à l'utilisateur de l'usage des modalités selon le contexte d'utilisation. Par exemple le mode vibratoire qui existe sur la plupart des téléphones mobiles actuels constitue une modalité de sortie que l'utilisateur peut choisir à la place de la modalité sonore. Cet aspect d'adaptation est particulièrement important : la liberté laissée à l'utilisateur de choisir une modalité ou une combinaison de modalités la plus efficace et la plus adaptée à un contexte d'utilisation évolutif (propriété inhérente aux situations de mobilité) constitue une condition déterminante de l'acceptation et de l'utilisation effective de l'artéfact. Lors de notre étude [6], afin de mettre les sujets en situation de réalisation d'une tâche familière, il leur était demandé d'utiliser une application de consultation de courriers électroniques au moyen d'un assistant personnel (PDA Jornada 540 series□, Hewlett Packard) connecté à leur messagerie personnelle. Quatre modalités d'interaction avec le système ont été retenues□ tactile (stilet), verbale, gestuelle et "interface incorporée". La modalité "interface incorporée" [14] consiste à associer des commandes à certaines manipulations de l'artéfact (changements d'orientation, mouvements, etc.). Par exemple comme le montre la Figure 1-a, l'utilisateur peut faire défiler les messages sur l'écran en basculant l'assistant personnel (PDA). La même commande peut être effectuée par un geste en trois dimensions reconnues par la caméra fixée sur le haut de l'assistant personnel, comme le montre la Figure 1-b. Ainsi, les utilisateurs étaient en mesure de réaliser les commandes selon la modalité de leur choix.



(a)



(b)

Figure 1  Commande de défilement de la liste de messages (a) "interface incorporée" (b) Geste reconnu par une caméra.

Si les commandes tactiles étaient exécutées automatiquement par l'application, pour les autres modalités nous avons utilisé la méthode du magicien d'Oz [1]. La mise en œuvre de cette méthodologie était motivée par le souhait d'utiliser un large éventail de modalités et de combinaisons de modalités en minimisant les contraintes et les coûts de développement. Les retours du compère étaient graphiques (sélection, ouverture, défilement, message d'erreur, etc.) ou verbaux (lecture du contenu du courrier électronique ou des messages d'erreur). Les résultats ont montré une grande variabilité inter-individuelle et ont confirmé l'importance de laisser le choix, puisque toutes les modalités ont été utilisées [6]. Tandis que l'approche magicien d'oz est très séduisante [1] pour tester des modalités difficiles à réaliser et coûteuses en temps de développement comme les "interfaces incorporées", elle soulève néanmoins le problème d'expérimentations en laboratoire qui va à l'encontre d'une situation de mobilité.

Plus généralement, le paradigme d'interaction WIMP (Windows, Icons, menus, Pointing devices) appliqué pour les interfaces graphiques sur stations de travail est à remettre en cause. Dans [32], les raisons suivantes sont avancées :

- WIMP implique une taille d'écran conséquente. "The user has screen real-estate to burn."
- WIMP implique que l'utilisateur soit capable de manipuler le curseur de façon précise . "The user has fine motor control."
- WIMP implique que le centre d'intérêt de l'utilisateur est constitué des informations affichées à l'écran. "Digital information is the primary task."

Confirmant la remise en cause du paradigme WIMP, J. Pascoe [28] présente un ensemble de principes de conception d'une interface sur une plate-forme mobile dédiée à un travail de terrain comme l'observation du comportement d'animaux ou l'archéologie. Par exemple l'un des principes est que l'attention de l'utilisateur est sur l'objet observé ou découvert et non sur l'écran. J. Pascoe [28] souligne alors le fait que la conception de l'interface va au delà du problème de la capacité interactionnelle réduite des dispositifs pour prendre en compte le contexte mobile d'usage.

Ne rejetant pas systématiquement le paradigme WIMP, C. Baber [2] propose de l'infléchir au cas de la fusion des mondes numériques et réelles. Il montre alors que le paradigme de réalité augmentée et d'interfaces tangibles est plus adapté. Dans ce contexte, la réalité augmentée (RA) est un paradigme d'interaction qui est né de cette volonté de fusionner les capacités de traitements informatiques et l'environnement physique. L'espace d'interaction devient plus vaste, il comprend l'environnement physique et ne se limite plus seulement à un ordinateur sur un bureau. Ainsi les objets physiques deviennent des supports à l'interaction. Par exemple G. Fitzmaurice [15] démontre l'usage d'un assistant personnel pour augmenter l'environnement physique de l'utilisateur. En déplaçant son assistant personnel au-dessus d'une carte par exemple, l'utilisateur obtient des informations affichées sur l'écran de l'assistant à propos de la ville que pointe son assistant sur la carte. La désignation de la ville se fait alors en déplaçant l'assistant personnel et non en pointant sur l'écran et l'affichage est automatiquement mise à jour. Pour des systèmes de réalité augmentée mobile, l'enjeu réside dans la conception et la réalisation de la fusion harmonieuse des deux mondes, le monde numérique et le monde réel dans lequel l'utilisateur évolue. Dans [22], nous trouvons une étude de la fusion des deux mondes reposant sur la cible de l'augmentation : trois cibles candidates à l'augmentation sont identifiées :

- l'utilisateur : il/elle est porteur d'un dispositif lui permettant par exemple de percevoir plus de données relatives à des objets réels.
- les objets : ils sont porteurs de dispositifs d'entrée/sortie informatiques, comme des capteurs de pressions.
- l'environnement : des dispositifs indépendants de l'utilisateur et des objets fournissent et rassemblent des données relatives à l'environnement physique.

1.3 Interaction sur supports mobiles : conclusion

A des fins analytiques nous avons organisé les études concernant l'interaction sur supports mobiles en trois classes : les techniques d'interaction, les collecticiels sur supports mobiles et la prise en compte du contexte. Nous avons détaillé dans le paragraphe précédent les études concernant les techniques d'interaction, la première classe d'études.

Il convient néanmoins de considérer ces trois classes comme non disjointes. Par exemple, la plasticité des interfaces [39] qui vise l'adaptation des interfaces et en particulier des techniques d'interaction au contexte tout en maintenant le même niveau d'utilisabilité concerne deux de nos classes d'études : techniques d'interaction et prise en compte du contexte. De plus, nous relevons dans la littérature des études sur des systèmes mobiles et collaboratifs qui exploitent le paradigme de la réalité augmentée. L'objectif est alors d'augmenter l'environnement physique de l'utilisateur mobile par des informations qui sont fournies par un autre utilisateur. C'est par exemple le cas de notre système MAGIC [31] dédié à un groupe d'archéologues en train de travailler dans un champ de fouilles. Par exemple, une technique d'interaction, la ballade augmentée, consiste à restituer un objet matériel dans son contexte d'origine, l'objet ayant été déplacé. La technique consiste à superposer une image de l'objet à son contexte d'origine (dans l'environnement physique), grâce à un casque semi-transparent porté par l'utilisateur mobile. La ballade augmentée est une technique de réalité augmentée mobile et collaborative. D'une part, il s'agit de réalité augmentée mobile car l'augmentation du monde réel est basée sur la localisation de l'utilisateur. Dans la plate-forme MAGIC, la localisation de l'utilisateur est connue grâce à un GPS, l'orientation de son regard par un magnétomètre. Lors de la capture d'un objet matériel, l'image de l'objet est stockée avec sa position. Ainsi un objet déplacé peut être restitué dans son contexte d'origine. D'autre part, il s'agit d'une collaboration asynchrone : un utilisateur capture d'abord un objet dans son contexte pour ensuite le déplacer ; un autre utilisateur peut ultérieurement percevoir l'objet déplacé dans son contexte d'origine. Détection de contexte et réalité augmentée s'unissent alors pour créer un environnement augmenté personnalisé.

5 CONCLUSION

Cet article souligne la variété des études concernant la mobilité des utilisateurs. En particulier nous avons détaillé deux aspects complémentaires des systèmes sur supports mobiles que sont l'accès aux données et l'interaction homme-machine. La variété des études traduit le dynamisme de cet axe de recherche et dessine les contours du vaste espace des possibilités. Cette variété souligne aussi la nécessité de travaux pluridisciplinaires, en Base de Données, en Interaction Homme-Machine

mais aussi en Système Réparti. C'est l'un des objectifs du groupe de travail "Mobilité et Ubiquité" du GdR I3 que de regrouper et confronter des travaux de disciplines informatiques distinctes.

Outre cette variété des études relevant de disciplines informatiques distinctes, nous constatons une diversité des domaines d'application et des usages. Dans [23], les usages sur supports mobiles sont organisés en cinq espaces :

- l'espace Information : l'accès à une liste de restaurants dans la ville où se trouve l'utilisateur mobile est un exemple d'usage de cet espace.
- l'espace Enrichissement personnel : par exemple A. Marcus [23] explique que les téléphones mobiles sont appelés "Kanny" par les adolescents finlandais, ce qui signifie extension de la main.
- l'espace Relation : par exemple, le système Hummingbird [19] permet à un groupe d'utilisateurs de rester en contact, chacun portant un petit objet, émetteur-récepteur.
- l'espace Amusement : en 2006, il est envisagé plus de 850 millions de joueurs sur téléphones mobiles jouant en réseau.
- l'espace Commerce : le porte-monnaie électronique définit un type d'usage de cet espace.

Au centre de ces cinq espaces d'usages, nous trouvons un sixième espace noté Identité. L'auteur souligne le fait que les informations, les services et l'interface sur supports mobiles doivent être personnalisés, adaptés à l'utilisateur. Un exemple de scénario d'usage est le suivant : l'utilisateur a prévu un voyage à Nancy ; la veille du départ, le système lui propose de consulter la météo à Nancy. L'utilisateur n'a pas alors à rechercher l'information. Parce que l'utilisateur porte la plate-forme mobile avec lui, elle devient un objet très personnel et le système peut accumuler de très nombreuses informations sur son activité quotidienne pour anticiper les besoins et fournir l'information adéquate à un instant donné. Cette approche soulève néanmoins le problème de la protection de la vie privée de l'utilisateur.

6 REFERENCES

- [1] Aublet-Cuvelier L., Carraux E., Coutaz J., Nigay L., Portolan N., Salber D., Zanello M.-L., "NEIMO, un laboratoire d'utilisabilité numérique : Leçons de l'expérience", *Actes de la conférence ERGO-IA'96*, AFCET SELF IDLS Publ., 1996, p. 149-160.
- [2] Baber C., Baumann K., "Embedded human computer interaction", *Applied Ergonomics*, 33, Elsevier Science, 2002, p. 273-287.
- [3] Balasubramaniam S., Pierce B., "What is a File Synchroniser", *Proc. 4th Annual ACM / IEEE Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom'98)*, 1998.
- [4] Bauer M., Heiber T., Kortuem G., Segall Z., "A Collaborative Wearable System with Remote Sensing", *Proceedings of ISWC'98 Second Int. Symp. on Wearable Computers*, 1998.
- [5] Bobineau C., Pucheral P., Abdallah M., "A Unilateral Commit Protocol for Mobile and Disconnected Computing". *Proc. of the 12th Conference on Parallel and Distributed Computing Systems*, Las Vegas, August 2000.
- [6] Calvet J., Kahn J., Zouinar M., Salembier P., Briois J.-C., Nigay L., Rey G., Pasqualetti L., "Etude empirique de l'usage de la multimodalité avec un ordinateur de poche", *Conférence IHM-HCI2001*, CEPADUES Publ., 2001, p. 5-8.
- [7] Cheverst K., Davies N., et al., "The role of connectivity in supporting context-sensitive applications", *Proceedings of the Conference on Handheld and Ubiquitous Computing HUC '99*, LNCS. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1999, p. 193-207.
- [8] Crowley J., Coutaz J., Rey G., Reignier P., "Perceptual Components for Context Aware Computing", *Proceedings of Ubicomp'2002*, LNCS, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2002.
- [9] Dey A., Abowd G., Salber D., "A Conceptual Framework and a Toolkit for Supporting the Rapid Prototyping of Context-Aware Applications", *Hu-man-Computer Interaction (HCI) Journal*, Vol. 16, Lawrence Erlbaum, 2001, p. 96-166.
- [10] Dix A., "Cooperation without (reliable) Communication: Interfaces for Mobile Applications", *Distributed Systems Engineering*, 2 (3), 1995, p. 171-181.
- [11] Ellis C.A., Gibbs S.J., "Concurrency Control in Groupware Systems", *Proc. ACM Int. Conf. on Management of Data (SIGMOD'89)*, Seattle, May 1989, p. 399-407.

- [12] Estublier J., (editor) "Software Configuration Management", Selected Papers of the ICSE SCM-4 and SCM-5 Workshops, n° 1005 in Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag, October 1995.
- [13] Feiler P.F., Downey G.F., "Transaction-Oriented Configuration Management: A Case Study", Technical Report CMU/SEI-90-TR-23 ESD-90/TR-224, Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, November 1990.
- [14] Fishkin K., Moran T., Harrison B., "Embodied User Interfaces: Towards Invisible User Interfaces", *Proceedings of EHCI'98*, Kluwer Academic Publishers, p 1-16.
- [15] Fitzmaurice G., "Situated information spaces and spatially aware palmtop computers", *Communications of the ACM*, 36, 1993, p. 38-49.
- [16] Fukumoto M., Tonomura, Y., "Body Coupled FingeRing: Wireless Wearable Keyboard", *Proceedings of CHI'97 Human Factors in Computing Systems*, ACM Press, New York, NY, 1997, p. 147-154.
- [17] Gray J., Helland P., O'Neil P., Shasha D., "Dangers of replication and a solution" \square *Proc. ACM Int. Conf. On Management of Data (SIGMOD'96)*, Montréal, Canada, June 1996, p. 173-182.
- [18] Grudin J., "CSCW: History and Focus", *IEEE Computer*, 27(5), 1994, p. 19-26.
- [19] Holmquist, L., "Supporting Group Collaboration with IPAD:s - Inter-Personal-Awerness Devices", *Workshop on Handheld CSCW at ACM CSCW'98*, 1998.
- [20] Huang E., Terry M., Mynatt E., Lyons K., Chen A., "Distributing Event Information By Simulating Word-Of-Mouth Exchanges", *Proceedings of MobileHCI'02*, LNCS, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2002.
- [21] Kamba, T., Elson S., "Using Small Screen Space More Efficiently", *Proceedings of CHI'96 Human Factors in Computing Systems*, ACM Press, New York, NY, 1996, p. 383-390.
- [22] Mackay W, "Réalité Augmentée : le Meilleur des Deux Mondes", *La Recherche*, 285, 1996, p. 80-84.
- [23] Marcus A., Chen E., "Designing the PDA of the Future", *Interactions*, January-February 2002, ACM Press, New York, 2002, p. 35-44.

- [24] Momin K.A., Vidyasankar K., "Flexible Integration of Optimistic and Pessimistic Concurrency Control in Mobile Environments", *Lecture Notes in Computer Science 1884*, Stuller et al. editor.
- [25] Nigay L., Salembier P., Marchand T., Renevier P., Pasqualetti L., "Mobile and Collaborative Augmented Reality: A Scenario based design approach", *Proceedings of MobileHCI'02*, LNCS, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2002.
- [26] Oviatt, S., "Ten myths of multimodal interactions", *Communications of the ACM*, 42 (11), 1999, p. 74-81.
- [27] Palen L., "Beyond the Handset: Designing for Wireless Communications usability", *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 9(2), June 2002, p. 125-151.
- [28] Pascoe J., Ryan N., Morse D., "Using While Moving: HCI Issues in Fieldwork Environments", *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 7(3), September 2000, p. 417-437.
- [29] Pitoura E., Bhargava B., "Data Consistency in Intermittently Connected Distributed Systems", *Transactions on Knowledge and Data Engineering*, November 1999.
- [30] Privat G., "Les objets communicants : nouvelle frontière des télécommunications ?", *Revue de l'Electricité et de l'Electronique (REE)*, EDP Sciences, Vol. 8, septembre 2002.
- [31] Renevier P., Nigay L., "Mobile Collaborative Augmented Reality, the Augmented Stroll", *Proceedings of EHCI'2001*, Revisited papers, LNCS 2254, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2001, p. 315-334.
- [32] Rhodes B., "The wearable remembrance agent: a system for augmented memory", *Proceedings of the first International Symposium on Wearable Computers*, IEEE Computer Society, 1997, p. 123-128.
- [33] Sarkar M., Snibbe S., Tversky O., Reiss, S., "Stretching the rubber sheet: a metaphor for viewing large layouts on small screens", *Proceedings of UIST '93, the 6th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, ACM Press, New York, 1993, p. 81-91.
- [34] Scholtz J., Lockhart P., Salvador T., Newbery J., "Design: no job too small.", *Proceedings of CHI'97 Human Factors in Computing Systems*, ACM Press, New York, 1997, p. 447-454.
- [35] Special Issue on Context-Aware Computing, *Human-Computer Interaction (HCI) Journal*, Vol. 16, Lawrence Erlbaum, 2001.

- [36] Special Issue on Location-Aware Computing, *IEEE Computer*, August 2001.
- [37] Suleiman M., Cart M., Ferrié J., "Concurrent Operations in a Distributed and Mobile Collaborative Environment", *Proc. 14th IEEE Int. Conf. on Data Engineering (IEEE / ICDE'98)*, Orlando, February 1998, p. 36-45.
- [38] Sun C., Ellis C.S., "Operational Transformation in Real-Time Group Editors", *Proc. ACM Int. Conf. on Computer Supported Cooperative Work (CSCW'98)*, Seattle, November 1998, p. 59-68.
- [39] Thevenin D., Coutaz J., "Plasticity of User Interfaces: Framework and Research Agenda", *Proceedings of Interact99*, IFIP IOS Press Publ., 1999, p. 110–117.
- [40] Tichy W.F., "RCS – A system for version control", *Software-Practice and Experience*, 15(7), July 1985, p. 637–654.
- [41] Ullmer B., Ishii, H. Glas, D., "MediaBlocks: Physical containers, transports, and controls for online media", *Proceedings of SIGGRAPH'98*, ACM Press, New York , 1998, p. 379-386.
- [42] Vidot N., Cart M., Ferrié J., Suleiman M., "Copies convergence in a distributed real-time collaborative environment", *Proc. ACM Int. Conf. on Computer Supported Cooperative Work (CSCW'00)*, Philadelphia, Pennsylvania, December 2000, p. 171-180.
- [43] Walborn G.D., Chrysanthis P.K., "Transaction Processing in PROMOTION", *Proc. 14th ACM Symposium on Applied Computing*, San Antonio, February 1999.
- [44] Walker A., Brewster S., McGookin D., Ng A., "Diary in the Sky: A Spatial Audio Display for a Mobile Calendar", *Joint Proceedings of HCI 2001 and IHM 2001*, BCS Conference Series, Springer-Verlag, 2001, p. 531-539.
- [45] Xml diff and merge tool. Online <http://alphaworks.ibm.com/>, June 2000.