

Mars 2012

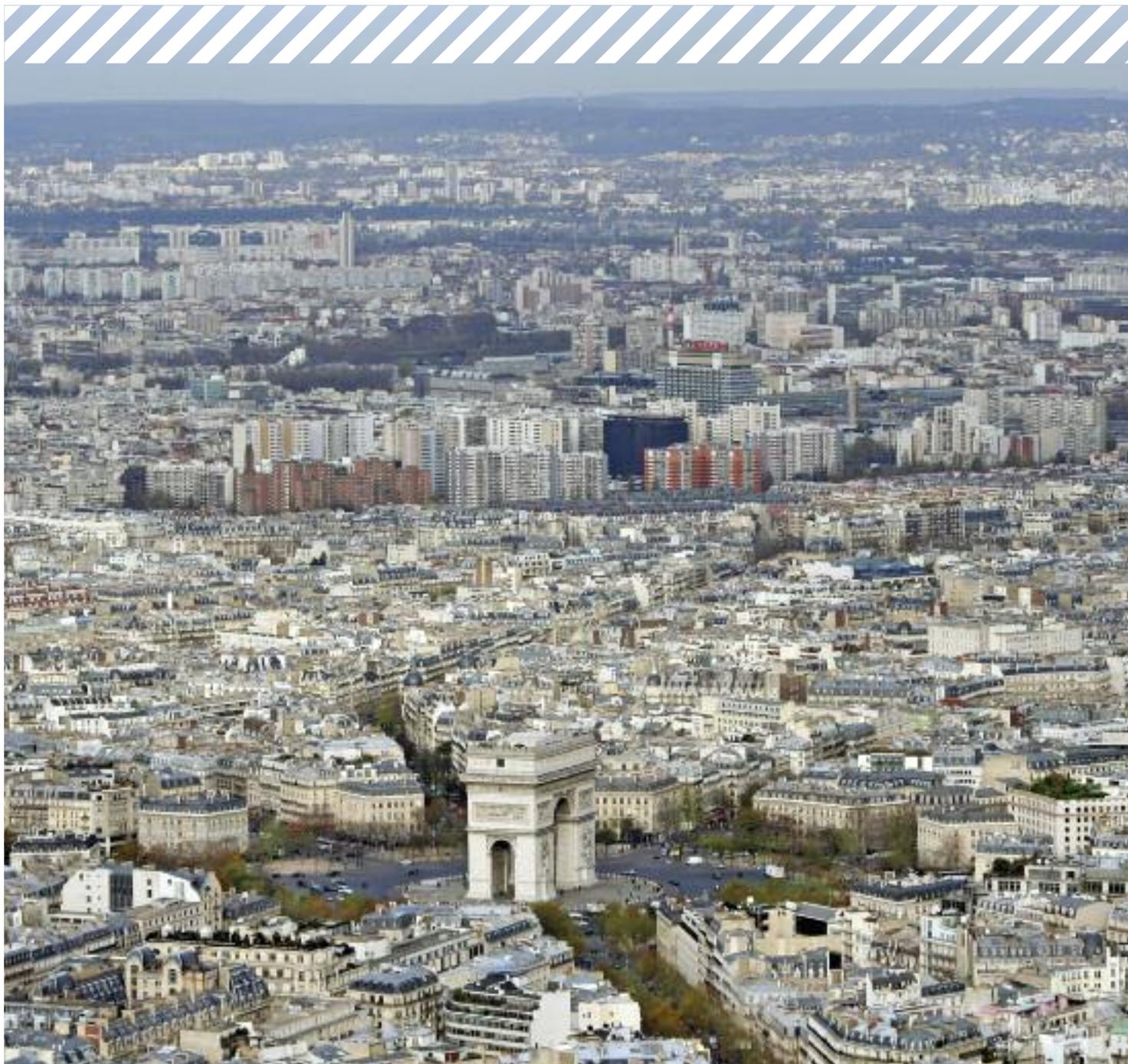
Faisabilité d'une enquête globale Transports (EGT) intégrale par association d'un GPS, d'un SIG et d'un système expert en Île-de-France

Rapport final



INSTITUT
D'AMÉNAGEMENT
ET D'URBANISME

ÎLE-DE-FRANCE



Groupe opérationnel n° 3
Subvention n° 09 MT CV 25





Faisabilité d'une Enquête Globale Transports (EGT) intégrale par association d'un GPS, d'un SIG et d'un Système expert en Île-de-France

Rapport final



Mars 2012

5.09.021 (numéro IAU)

09 MT CV 25 (numéro PREDIT)

Faisabilité d'une Enquête Globale Transports (EGT) intégrale par association d'un GPS, d'un SIG et d'un Système expert en Île-de-France

Rapport final

Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Île-de-France (IAU îdF)

15, rue Falguière 75740 Paris cedex 15

Tél. 01.77.49.77.49 - Télécopie 01.77.49.77.69

E-mail : dgcomm@iau-idf.fr –http : www.iau-idf.fr

Directeur Général : **François DUGENY**

Directeur du Département Mobilité et Transports : **Alain MEYERE**

Rapport réalisé par :

Dany NGUYEN-LUONG, chargé d'études

© IAU îdF mars 2012

Un Comité de suivi de la recherche a été constitué avec des représentants des co-financeurs « historiques » de l'EGT et des partenaires institutionnels :

- Quentin Bakhtiari puis Arnaud Lagrange (Predit GO3, MEEDDM/DGIDM/SAGS)
- Thierry Siméon puis Anne-Eole Meret et Christèle Paulo (STIF)
- Christine Couderc (DRIEA) puis Denise Schmitt (DRIEA)
- Thi-Phuong-Tram Simonet (DRIEA)
- Jean Delons (Cofiroute)
- Hélène Hering (SNCF) puis Emmanuel Deval (SNCF)
- Nathalie Siméon (RATP)
- Jean-Loup Madre (IFSTTAR)
- Jimmy Armoogum (IFSTTAR)
- Nicolas Merle puis Mathieu Rabaud (CETE Nord Picardie)

Au sein de l'IAU îdF, une équipe pluridisciplinaire a été mise en place :

- Dany Nguyen-Luong, ingénieur
- Jean-Paul Coindet, responsable de la réalisation de l'EGT 1991-1992 à la DREIF
- Jean-Raymond Fradin, responsable de la réalisation de l'EGT 1982-1983 à la DREIF
- Jérémy Courel, statisticien
- Agnès Messenet, géomaticienne

L'étude a bénéficié des nombreux échanges avec Hélène Charreire (Lab'Urba de l'Université de Paris-Créteil), Basile Chaix (INSERM), Philippe Marchal et Pierre-Olivier Flavigny (IFSTTAR), Jean-Baptiste Prost (Pole Star).

SOMMAIRE

1. Introduction	9
1.1. Objet.....	9
1.2. Les limites de l'Enquête Globale Transports (EGT)	9
1.3. Objectifs de la recherche	10
1.4. Valorisation de la recherche	11
2. Etat de l'art.....	13
2.1. D'une enquête « complément » à une enquête « intégrale »	13
2.2. Les enquêtes « GPS-only »	13
2.2.1. L'enquête de Cincinnati	13
2.2.2. L'enquête de Sydney	14
2.2.3. La prochaine ENT en Grande Bretagne intégralement par GPS ?	14
2.3. Autres utilisations du GPS	15
2.3.1. Revue	15
2.3.2. Champ d'application élargi de notre recherche	17
2.4. Recherches de l'IFSTTAR	17
2.5. Projet du CERTU	18
2.6. Recherches de l'INSERM (projet RECORD).....	19
2.7. Question de la conformité avec la CNIL.....	20
3. Technologies et outils informatiques employés	23
3.1. Le GPS.....	23
3.1.1. Généralités	23
3.1.2. Précision des mesures et le "DOP"	24
3.1.3. Un avenir prometteur pour la précision et les récepteurs GPS	26
3.1.4. Les traceurs GPS.....	27
3.1.4.1. Première étude de benchmarking fin 2009.....	27
3.1.4.2. Deuxième étude de benchmarking fin 2011	30
3.1.5. Les fabricants de puces GPS.....	34
3.2. Le SIG	35
3.3. Le système-expert	39
3.3.1. Définition.....	39
3.3.2. Les ambiguïtés	41
3.3.3. Le logiciel système-expert G-TO-MAP	41
3.3.3.1. Pré-traitement	42
3.3.3.2. Identification des déplacements	43
3.3.3.3. Détection des modes	44
3.3.3.4. Détection des motifs.....	44
3.3.3.5. Nécessité d'une enquête de suivi.....	45
3.3.3.6. Conclusions	45
3.4. Autres technologies à intégrer	46
3.4.1. Les signaux Wifi.....	46
3.4.2. Les capteurs inertiels	47
3.4.2.1. Les accéléromètres.....	47
3.4.2.2. Les gyromètres	48
3.4.2.3. Les magnétomètres	48
3.4.2.4. Les pedomètres	49
3.4.3. Le GSM/GPRS	49
3.5. Les smartphones	49
4. Expérimentation	53

4.1. Rappel de la structure de l'EGT	53
4.2. Méthodologie	54
4.3. Protocole	56
4.4. Agenda et mise en place d'un observatoire	59
4.5. Exemples d'enregistrements GPS	61
5. Résultats	63
5.1. Variable mode regroupé	63
5.2. Variable chaîne modale	65
5.3. Variable durée	66
5.4. Variable heure de départ	69
5.5. Variable motif regroupé	70
5.6. Variable multimodalité	71
5.7. Variable distance	72
5.8. Synthèse des résultats	75
5.8.1. Les avantages	75
5.8.1.1. Variables gagnantes	75
5.8.1.2. Gains en méthodologie	75
5.8.2. Les inconvénients	76
5.8.2.1. Variables perdantes	76
5.8.2.2. Problèmes méthodologiques	78
6. Conclusions et perspectives	81
Bibliographie	85
Annexe 1 : Questionnaire individu simplifié	87
Annexe 2 : Extrait de la base finale des déplacements.....	89
Annexe 3 : Procédure d'utilisation du traceur QStarz	91
Annexe 4 : Procédure d'importation des enregistrements GPS dans le SIGR	93
Annexe 5 : Estimation financière sommaire d'une EGT par GPS	95

1. Introduction

1.1. Objet

Ce rapport final présente les résultats et conclusions de la recherche. Il fait suite à un rapport intermédiaire remis en décembre 2010. La recherche a commencé en novembre 2009 et a duré 28 mois comme prévu. Elle constitue la première phase d'un projet à long terme d'« EGT par GPS » et ouvre un champ d'applications très large de l'utilisation du GPS dans les enquêtes de mobilité en général.

Un Comité de suivi a été constitué avec les partenaires "historiques" de l'EGT.

Un site internet a été mis en place afin de faire connaître le projet : www.iau-idf.fr/egtpargps

1.2. Les limites de l'Enquête Globale Transports (EGT)

L'Enquête Globale Transports en Île-de-France est un outil d'observation et de mesure très important de la mobilité des Franciliens. La méthodologie d'enquête en face-à-face bénéficie d'un recul de plus de quarante ans (la première EGT date de 1968). Mais il existe un consensus scientifique pour considérer que l'EGT, et plus généralement les enquêtes ménages déplacements s'appuyant sur la méthodologie dite « standard CERTU », ne sont pas exemptes de défauts. Les principales critiques concernent principalement :

- les lacunes sur les déplacements très courts qui sont réputés pour n'être pas toujours déclarés,
- les lacunes sur les itinéraires,
- la définition de distance qui est une distance euclidienne et non une distance réseau même s'il est possible techniquement d'améliorer la qualité de cette donnée,
- les imprécisions sur les durées,
- la limitation à un seul jour d'enquête (la veille de l'entretien),
- la difficulté pour l'enquêteur de franchir la barrière des digicodes dans l'habitat collectif, même si les biais possibles individuel-collectif sont contrôlés au cours de l'enquête terrain,
- la mise à disposition trop différée (il a fallu environ 18 mois entre la fin de l'enquête et la mise à disposition des fichiers finaux pour l'EGT 2001-2002 à cause des travaux de contrôles d'intégrité et de redressements),

- et le coût, de six à sept millions d'euros pour la dernière EGT, « l'EGT 2010 » en Île-de-France pour 18 000 ménages (qui s'est déroulée pour la première fois sur deux ans, de 2009 à 2011), dû en grande partie à l'intervention humaine.
- Ce coût élevé a pour conséquence une fréquence de réalisation faible (une enquête tous les neuf ans en moyenne). C'est une limite majeure de l'EGT traditionnelle, alors que le besoin pour les études serait d'une EGT tous les 3 à 4 ans.

Un consensus semble se dégager aujourd'hui en Île-de-France : la prochaine EGT ne se fera plus dans sa forme actuelle.

1.3. Objectifs de la recherche

Notre recherche vise à moderniser, dynamiser l'EGT et à préparer son avenir en utilisant des moyens modernes. Les nouvelles technologies nous guident de plus en plus dans nos choix méthodologiques des enquêtes mobilité. Il s'agit d'étudier la faisabilité d'une EGT réalisée intégralement par collecte de données GPS donc **sans enquêteur à domicile**, leur traitement par un Système d'Information Géographique (technique de "map-matching" sur le Mode d'Occupation du Sol numérisé) et la génération automatique par un système expert d'une base de données déplacements et moyens. L'expérimentation réalisée au cours de cette recherche a évalué la possibilité de créer une base de données la plus proche possible d'une base de données qui serait issue d'une EGT classique papier.

Cette nouvelle méthodologie vise à remédier aux défauts de l'actuelle EGT en minimisant l'intervention humaine et en homogénéisant le recueil de données. On attend de la base de données générée qu'elle apporte :

- des informations nouvelles sur les itinéraires et les déplacements très courts qui sont parfois omis,
- des précisions sur des variables fondamentales que sont les distances et les durées,
- des informations nouvelles sur la multimodalité car on propose de suivre le même individu sur 7 jours (et non pas un seul jour comme dans l'EGT classique).

A priori, la difficulté principale porte sur l'identification des motifs de déplacements mais nous proposons d'innover en utilisant la couche Mode d'Occupation du Sol (MOS) du Système d'Information Géographique Régional (SIGR) mis au point à l'IAU qui est l'inventaire numérisé de l'occupation du sol en Île-de-France composé de 400 000 polygones codés en 83 postes différents.

Une expérimentation sur 23 individus volontaires a été mise en place entre février et avril 2010, en procédant **simultanément** à une enquête EGT classique et à une enquête par GPS, réalisées par deux équipes **indépendantes**. Puis les bases de données des deux enquêtes ont été construites de manière séparée par les deux équipes puis fusionnées. Ce rapport présente les résultats de la comparaison des deux bases ainsi que les avantages et les inconvénients de la nouvelle méthodologie. Il ouvre une piste de recherche peu explorée par les chercheurs en transports qui s'intéressent essentiellement au post-processing des données GPS. C'est une piste axée sur les technologies complémentaires au traceur GPS pour répondre aux besoins de l'EGT. La recherche fait aussi des recommandations quant au niveau d'intervention humaine minimum à mettre en place (sur la partie ménages et individus du questionnaire, sur un suivi téléphonique léger et personnalisé, etc). En annexe 5 figure une estimation sommaire du coût d'une EGT intégrale par GPS.

Au final, la recherche tente de répondre à la question suivante : l'enquête globale transports peut-elle être réalisée intégralement par GPS et sans enquêteur à domicile ? Nous entrons dans une période de cinq ans où l'EGT 2010 va accaparer les moyens humains pour réaliser les études de mobilité. Les problèmes rencontrés lors de la réalisation de l'enquête seront quelque peu oubliés. Il serait sage cependant de réfléchir dès maintenant à une nouvelle méthodologie en vue de l'EGT 2017-2018 et ne pas attendre 2016. La thèse que nous tentons de défendre ici est qu'il est possible de réaliser intégralement par GPS une enquête ménage déplacements à moindre coût sous certaines conditions et de se passer d'enquêteur à domicile, en obtenant certaines données plus précises et plus riches mais aux dépens d'autres.

1.4. Valorisation de la recherche

La recherche a connu deux valorisations au cours de la première année :

- la première lors d'une communication à la 12^{ème} Conférence WCTR à Lisbonne le 13 juillet 2010,
- la deuxième lors de la Journée MCST à l'ENPC le 25 novembre 2010.

La réelle valorisation consistera à poursuivre cette première phase en suivant les conclusions et perspectives de ce rapport. Ainsi, il est prévu une phase 2 de développement d'une application spécifique de tracing sur smartphone et d'une expérimentation en conditions réelles en Île-de-France.

2. Etat de l'art

2.1. D'une enquête « complément » à une enquête « intégrale »

C'est aux Etats-Unis que l'utilisation du GPS dans les enquêtes de déplacements est la plus avancée dans le monde, la première expérimentation ayant eu lieu en 1996 à Lexington (Kentucky). Une première revue de la littérature montre que jusqu'à fin 2007, la collecte de données par GPS était considérée comme un simple **complément** (" a component" avec un taux d'échantillonnage de 5 à 10% par rapport à l'échantillon total) à une enquête papier classique, comme moyen de valider ou de corriger une enquête papier traditionnelle, et non comme une **alternative**. Ainsi, dans plusieurs enquêtes ménages déplacements régionales (à New-York entre autres), un sous-échantillon des ménages enquêtés est suivi par GPS.

A partir de 2008, il semble que les esprits commencent à changer progressivement et que la perspective d'une enquête déplacements intégralement réalisée par GPS commence à devenir réalité ("GPS-only travel survey" et "Person-based approach"). C'est ainsi qu'est mise en place pour la première fois en 2009-2010 aux Etats-Unis une enquête ménages déplacements dans la région de Cincinnati (Etat de l'Ohio) portant sur 4000 ménages.

2.2. Les enquêtes « GPS-only »

2.2.1. L'enquête de Cincinnati

Selon Giaimo *et al* (2010) et Mukarami (2010), les caractéristiques principales de cette enquête intégrale par GPS dans l'Ohio sont :

- échantillon de 4000 ménages valides (au départ, il y en avait 6500).
- seuls les individus de 12 ans et plus sont enquêtés. Pour les 6-11 ans, une enquête papier classique est réalisée sur un jour seulement.
- 3 jours d'enquête (c'est la durée d'autonomie du traceur GPS retenu).
- enquête de juillet 2009 à juin 2010.
- 600 traceurs GPS passifs avec un seul bouton on/off, en rotation.
- un sous-échantillon d'enquêtés (600) sert de base d'apprentissage à un réseau de neurones artificiels pour inférer les motifs et les modes.
- une enquête de suivi par internet est mise en place pour préciser certaines informations sur les motifs, les modes, l'accompagnement, ... Les participants visualisent leurs propres traces GPS sur internet et valident ou pas les informations.

- dans le questionnaire individu préalable à l'enquête, on pose des questions sur les lieux les plus fréquentés et leurs adresses : lieu de travail, deux lieux pour motif achat, lieu de l'école.
- la récupération des traceurs se fait soit par courrier prépayé soit par coursier. On relève un taux de non-retour de 3% sur les deux premiers mois d'enquête impliquant surtout des individus à faibles revenus.
- il semble que chaque enquêté reçoit une récompense de 25 dollars.
- l'algorithme d'imputation des modes est correct à 95%.
- constats sur la mauvaise utilisation des traceurs : oubli de le porter, oubli de recharger la batterie, mélange entre des traceurs au sein d'un ménage.

2.2.2. L'enquête de Sydney

C'est en Australie qu'a eu lieu la deuxième enquête "GPS-only". Le protocole, similaire à celui de Cincinatti, a été mis au point par le Pr Peter Stopher, qui est devenu un ardent défenseur de cette nouvelle méthodologie, après avoir travaillé près de 40 ans sur la méthodologie des enquêtes déplacements papier (il a soutenu sa thèse sur le sujet en 1965). Il a présenté deux articles lors du dernier WCTR à Lisbonne en 2010. L'enquête intégrale par GPS à Sydney sur 3000 ménages a commencé le 15 août 2010 et a duré 12 mois. Début 2012, il n'y avait pas encore de publication.

2.2.3. La prochaine ENT en Grande Bretagne intégralement par GPS ?

Le Ministère des Transports (DfT) de Grande Bretagne a commandé une vaste étude en 2010 sur la faisabilité d'une Enquête Nationale Transports (NTS : National Travel Survey) intégralement réalisée par GPS et sans enquêteur. L'étude pilote a porté sur 902 individus, âgés de plus de 12 ans, qui ont été suivis par GPS pendant une semaine. Les taux de recrutement sont comparables à ceux de l'enquête papier. Seulement 0,4% des traceurs n'ont pas été retournés (Rofique et al, 2011). En récompense, chaque participant a reçu un bon d'achat de 5 livres sterling (environ 6 €). Il a été constaté que :

- les participants oubliaient parfois leur boîtier en sortant,
- les participants oubliaient parfois de recharger la batterie,
- ils ne savaient pas si la batterie était encore chargée,
- ils ne savaient pas si le traceur enregistrait (signification des diodes du traceur peu claire),

- si un problème survenait, ils ne savaient pas qui appeler.

Il se trouve que l'expérimentation que nous avons menée en 2010 dans le cadre de notre recherche était antérieure à cette étude du DfT. Elle a été basée sur un protocole rigoureux et directif (voir paragraphe 4.3) pour éviter justement ces problèmes pratiques que nous avions anticipés.

La « récompense » de 6 € apparaît trop faible pour motiver les participants. Il s'agit quand même de porter un traceur pendant une semaine, de le recharger régulièrement et de respecter quelques « obligations » (répondre aux questionnaires ménages et individus, retourner le traceur), ce qui peut expliquer en partie un taux de recrutement à peine égal à celui de l'enquête classique.

Début 2011, le DfT réfléchit pour son NTS de 2013 au basculement de l'enquête classique au tout GPS (Rofique et al, 2011) mais aux dernières nouvelles (mi-février 2012), il serait plutôt réticent.

2.3. Autres utilisations du GPS

2.3.1. Revue

Les enquêtes ménages déplacements dans le monde introduisent de plus en plus le GPS en **complément** de l'enquête classique. C'est le cas des enquêtes de la région de Minneapolis de 2010 à 2012 et de la région de Los Angeles de 2011 à 2012. La première comporte un sous-échantillon de 500 ménages suivis par GPS et la deuxième 1750. Ces deux enquêtes ne sont pas des enquêtes "GPS-only" mais bien des compléments à l'enquête classique. Pour la deuxième enquête, il a été observé un taux de non-retour des traceurs de 15%. Ce taux s'accumulant sur les vagues d'enquêtes successives, au final 50% des traceurs sont perdus sur les 700 achetés au départ. Par ailleurs, chaque enquêté est rémunéré 25 \$ pour 3 jours de suivi. Quelques post-traitements des traces GPS sont exécutés sur le logiciel ArcGis (ModelBuilder, TrackingAnalyst) mais tout n'est pas automatisé. Enfin il semble que le traceur utilisé comporte un capteur inertiel et qu'il ne s'active que s'il y a mouvement. Dernier enseignement intéressant : l'enquête utilise la technologie des codes-barres pour gérer la flotte de traceurs (source : abt SRBI, communication à la Conférence ESRI à San Diego en 2011).

Bricka et al (2010) ont mené une expérimentation portant sur un sous-échantillon de l'Enquête ménages déplacements de l'Etat d'Indiana aux Etats-Unis (272 individus enquêtés

par les 2 méthodes GPS et papier). Ils concluent que la méthode par GPS est plus adaptée pour les jeunes alors que c'est la méthode papier classique qui devrait être utilisée pour les personnes âgées. C'est une conclusion qui paraît difficile à mettre en pratique.

A San Francisco, des cyclistes sont suivis par GPS pour des études de déplacements en mode vélo. L'application CycleTracks sur iPhone et smartphone Android est utilisée (voir <http://www.sfcta.org/content/view/666/375>).

Il existe un autre projet américain intéressant : le projet Mobile Millennium, mené par l'Université de Berkeley, le Centre de Recherche de Nokia à Palo Alto et Navtech, avec le soutien de Caltrans et du DOT fédéral aux Etats-Unis. Il consiste à collecter des données de trafic routier, de vitesse et de temps de parcours en temps réel sur les principales autoroutes autour de San Francisco à partir de smartphones équipés de GPS installés dans des véhicules dits "flottants". Mais ces données collectées en temps réel nécessitent un post-traitement très complexe pour pouvoir être converties en diagrammes classiques¹. Dans quasiment tous les smartphones, la localisation GSM peut accélérer la localisation GPS (fonction "Assisted GPS" avec une puce A-GPS²). Un test de 6 mois (automne 2009 – printemps 2010) a eu lieu sur une aire restreinte, avant un déploiement prévu sur 12 mois. Un appel au volontariat a été lancé avec un objectif de 10 000 participants. Ce projet montre l'intérêt d'utiliser la technologie GPS comme nouvelle source de données de trafic routier en temps réel mais diffère de l'utilisation d'un GPS porté par un individu dans le cadre d'une enquête déplacements.

Voir <http://traffic.berkeley.edu/theproject.html>

Il y a ainsi de multiples recherches dans le monde utilisant les enregistrements GPS ou GSM comme source de données. Ces recherches concernent majoritairement le mode VP (les traceurs sont embarqués dans les véhicules). Signalons aussi les recherches réalisées par le Georgia Institute of Technology à Atlanta depuis quelques années en utilisant les traceurs GPS (recherche sur l'analyse de boucles de déplacements, sur le choix modal, etc)

Voir <http://commuteatlanta.ce.gatech.edu/papers.html>)

¹ Attention, c'est bien la localisation par GPS qui est utilisée et non la localisation cellulaire GSM des téléphones portables qui, elle, n'a qu'une précision de 300 m en ville, 600 m en péri-urbain et plusieurs km dans le rural.

² Le GPS assisté ou « A-GPS » permet d'optimiser le démarrage à chaud du GPS à un temps toujours inférieur à 15 secondes après le premier démarrage. L'efficacité de l'A-GPS diminue au fil du temps. Une fois expiré, il faut à nouveau télécharger les données d'almanach, sinon l'accélération du démarrage serait totalement inefficace.

Citons enfin les travaux au MIT dans le laboratoire d'Alex Pentland "Human Dynamics Laboratory". Ils ont inventé le concept de "Reality Mining" qui exploite des données issues de capteurs pour prédire le comportement humain. Entre 2004 et 2005, des données issues de téléphones portables et autres capteurs ont été collectées sur une centaine de volontaires, soit plus de 500 000 heures de données. Cette BD gigantesque permet de faire des analyses sur le comportement humain et ses interactions avec l'environnement.

Voir <http://reality.media.mit.edu>

2.3.2. Champ d'application élargi de notre recherche

Au-delà de l'utilisation dans l'EGT, le GPS peut être exploité dans **toute enquête mobilité**, et par seulement par les planificateurs des transports régionaux. Les exploitants des transports (SNCF, RATP) exploitent déjà beaucoup le GPS pour offrir des services liés à la géolocalisation (guidage multimodaux, temps d'attente, etc) mais ils ont très peu de connaissance sur les déplacements de leurs clients. Leurs seules sources d'information sont des enquêtes traditionnelles par entretien en face-à-face, par téléphone ou par formulaire papier à remplir aux gares ou dans les bus. Il s'agit de mieux connaître par le suivi GPS les origines et destinations au niveau de l'adresse postale, les modes de rabattement et de diffusion aux gares, les heures de d'arrivée aux gares, les motifs à l'origine et à destination, la multimodalité, etc. Il y a d'autres demandes, de la part des sociétés d'autoroutes à péage, des Communautés de communes, etc, qui envisagent des enquêtes de mobilité. C'est vrai aussi dans d'autres disciplines comme en santé publique (voir paragraphe 2.6). Donc les traceurs GPS pourraient être utilisés dans bien d'autres enquêtes que l'EGT.

2.4. Recherches de l'IFSTTAR

En France, la recherche dans le domaine n'est pas en reste. L'utilisation du GPS a été plusieurs fois expérimentée dans le suivi de véhicules "flottants" pour recueillir des données de temps de parcours (les GPS sont fixés dans les véhicules). Mais dans les enquêtes ménages déplacements, elle se réduit à trois expérimentations mises en œuvre par l'IFSTTAR : la première à Bordeaux et Nantes en 2005 avec l'aide de l'INSEE, la seconde à Lille en 2007 avec l'aide du bureau de sondages ISL, et la troisième dans le cadre de l'Enquête Nationale Transports (ENT) 2007-2008 sur un sous-échantillon (utilisation de 170 traceurs). Ces trois expérimentations utilisent un logiciel appelé CAPI-GPS mais n'exploitent pas les potentialités d'un SIG et ne sont pas réalisées dans des conditions "réelles" d'une

enquête intégrale par GPS sans enquêteur telles que nous l'envisageons. En effet, les traceurs sont apportés un jour puis récupérés au domicile un autre jour par un enquêteur qui télécharge sur place les données et pose des questions aux enquêtés pour obtenir quelques précisions sur les modes et les motifs. Par ailleurs, le taux d'acceptation est faible, selon l'IFSTTAR. Il faudra sans doute se poser la question de la motivation par une éventuelle rétribution des enquêtés, comme c'est le cas dans l'enquête de Cincinnati ou dans l'ENT en Grande-Bretagne. Deux thèses sont en cours à l'IFSTTAR sur l'utilisation du GPS dans les Enquêtes Ménages Déplacements (EMD) et sur la manière de combiner une enquête traditionnelle légère avec une enquête par GPS (Marchal, Madre et Nguyen, 2011).

En juin 2007, l'IFSTTAR considérait que les enquêtes par GPS ne peuvent pas remplacer complètement les méthodes classiques : « les enquêtes par GPS sont pour l'instant utilisées en complément des questionnaires classiques. Elles devraient cependant permettre à plus long terme d'alléger les questionnaires. Indépendamment des difficultés techniques et logistiques liés à la mise en place d'une telle chaîne de collecte et au traitement des données, une interrogation importante concerne l'acceptabilité de cette forme d'enquête en France. » (Armoogum et al, 2007, page 63). Un des objectifs de notre recherche est d'étudier si ces affirmations sont encore fondées en 2012. Est-il possible aujourd'hui de réaliser les parties "déplacements et trajets" de l'EGT sans faire appel à des enquêteurs à domicile ? Quels seraient les compléments ou modifications à apporter (questionnaire simplifié sur les motifs, enquête téléphonique légère de suivi ciblée sur les motifs, recueil d'informations complémentaires par internet comme à Cincinnati et Sydney, récompense, etc) ?

Par ailleurs, l'IFSTTAR conduit en 2011-2012 des tests sur quelques matériels GPS grand public (y compris des smartphones multi-capteurs) et sur la méthodologie de collecte, qui pourraient alimenter les réflexions du CERTU pour son projet d'expérimentation GPS dans les Enquêtes Ménages Déplacements (EMD).

2.5. Projet du CERTU

Le CERTU, assisté du CETE Nord Picardie, étudie depuis fin 2011 la possibilité d'une expérimentation GPS dans les Enquêtes Ménages Déplacements (EMD). Cette expérimentation GPS serait un complément d'une EMD au cours de la saison 2013-2014. Le but est d'étudier la faisabilité d'un déploiement et d'une adaptation méthodologique à plus grande échelle : quels sont les gains (d'information, financier) et les contraintes ?

A ce jour, la méthodologie n'a pas encore été définie de manière précise. Plusieurs questions sont encore en débat : construction des échantillons (différents groupes contrôle avec/sans GPS), taux de sondage de l'échantillon GPS, choix des secteurs géographiques, nombre de jours d'enquête, choix du logiciel expert, choix du traceur GPS, récompense des participants.

Le CERTU mène aussi des réflexions sur l'anonymisation des données GPS et sur la conformité d'une enquête GPS avec la loi Informatique et Liberté. Il serait possible selon le CERTU de « flouter » les extrémités des déplacements.

Quoi qu'il en soit, le CERTU est parti sur l'idée que le GPS est un complément et non un substitut à l'enquête papier traditionnelle. Donc le recours à des enquêteurs habitués aux EMD sera encore nécessaire. Mais les réflexions de l'IAU, du CERTU et de l'IFSTTAR se rejoignent au moins sur l'absolue nécessité d'améliorer la fiabilité du recueil des traces GPS en amont, c'est-à-dire d'obtenir les points les plus « propres » possibles, sans coupure de signal et nettoyés des points parasites autour d'un lieu d'activités, avant de les faire passer dans le système-expert de reconnaissance des variables caractérisant les déplacements.

2.6. Recherches de l'INSERM (projet RECORD)

Au cours de notre recherche, nous avons découvert que la technologie GPS était très utilisée dans le domaine de l'épidémiologie/santé publique, et que les professionnels de la planification des transports et les épidémiologistes partageaient les mêmes préoccupations quant aux outils d'observation des individus, de leurs déplacements pour les premiers, des activités physiques pour les seconds (Oliver, 2010). Le GPS est apparu comme un point commun aux deux métiers a priori sans aucun lien. Ainsi, l'INSERM envisage d'utiliser à grande échelle (8000 participants) des traceurs GPS dans la deuxième phase du projet RECORD (Residential Environment and CORonary heart Disease). Dans la première phase, cette étude de cohorte épidémiologique portant sur 7300 participants visait à mieux connaître l'influence que le quartier de résidence peut avoir sur la santé. Par exemple, un faible niveau socio-économique, un environnement alimentaire malsain, des relations sociales dégradées, augmentent-ils le risque d'obésité, d'hypertension, de troubles coronaires, etc.

Voir <http://www.record-study.org>

L'INSERM va donc lancer une deuxième cohorte à partir de 2012. De nouvelles questions se posent sur l'influence de la mobilité et des lieux d'activité sur la santé. Pour cela, il est envisagé de suivre les participants par GPS. Actuellement, l'équipe réfléchit au type de traceur GPS adéquat, à la combinaison avec un accéléromètre et à une application de suivi sur Internet (Chaix, 2011). Les questions posées par notre recherche recourent complètement celles de l'étude RECORD. La disponibilité d'un matériel traceur simple et fiable intégrant un capteur inertiel, a minima un détecteur de mouvement, apparaît à tous comme un préalable à cette enquête. L'idée de développer une application spécifique de tracing sur smartphone exploitant un maximum de technologies et adaptée aux besoins des enquêtes de suivi d'individus (EGT et RECORD) a été largement partagée par les acteurs (CERTU, IAU, IFSTTAR, INSERM). En fait, c'est tout un ensemble d'équipements et de moyens humains qu'il faudrait mettre en œuvre : traceurs GPS et capteurs inertiels, puce et antenne GSM/GPRS, serveur d'acquisition des données à distance, logiciel système-expert, équipe de reconnaissance visuelle, application de suivi sur internet.

Par ailleurs, l'INSERM envisage de développer ou d'utiliser plusieurs outils :

- un logiciel gestionnaire du protocole. Il servirait d'abord d'interface de présentation standardisée pour uniformiser l'information transmises aux enquêtés et faciliter le travail des enquêteurs. Il permettrait aussi la collecte des informations opérationnelles, la gestion des participants et la logistique des traceurs.
- un logiciel d'enquête de suivi (« Prompted Recall », tel que HTS, UTRACS, TDE). Il y a aussi l'option de développer un logiciel adhoc qui permettrait à l'enquêté de corriger/compléter lui-même la trace GPS (déplacement supplémentaire, modes, motifs, etc.) avec une interface soignée et ergonomique, mais nécessite la présence de l'enquêté devant l'écran.

Enfin, selon l'INSERM, pour être en conformité avec la CNIL, il suffirait de faire signer un formulaire de consentement, procédure standard dans les enquêtes de l'INSERM. Ceci est évidemment à vérifier auprès de la CNIL directement.

2.7. Question de la conformité avec la CNIL

Les aspects juridiques de la géolocalisation des déplacements dépassent le cadre de notre recherche car toutes les enquêtes faisant appel à l'utilisation de données GPS, GSM ou Wifi sont concernées. Néanmoins on ne peut évacuer complètement la question ici.

Comment faire respecter les données personnelles lorsque la technologie permet, à l'insu de la personne ou même avec son accord, de suivre à la trace les déplacements de la personne ?³

Du côté de l'individu, s'il n'accepte guère les intrusions dans sa vie privée, il est paradoxalement demandeur de services géolocalisés lui facilitant certaines de ses démarches. Il convient malgré ce paradoxe de le sensibiliser sur les éventuels risques et de protéger ses données personnelles. La CNIL recommande par exemple que le dispositif de géolocalisation ne mentionne pas la vitesse maximale du véhicule mais sa vitesse moyenne, car en effet, il revient aux autorités judiciaires et non à un prestataire de constater d'éventuelles infractions au code de la route.

Nous évoquons quelques pistes de réflexion juridique pour éviter le blocage de notre recherche sur les plans technique et méthodologique :

- Une enquête réalisée par GPS ne peut recruter que des participants volontaires. Un formulaire de consentement doit être signé. Pour motiver le volontaire, une éventuelle récompense peut être envisagée. Ce qui est sûr, c'est que nul ne doit être localisé à son insu. Cependant, la CNIL a précisé dernièrement que le consentement ne suffit pas à rendre légitime tout traitement de données personnelles. Après avoir protégé l'individu contre les intrusions des tiers, la CNIL en vient à protéger l'individu contre lui-même.
- La base de données brutes des traces GPS ne doit être conservée que le temps du traitement, c'est-à-dire le temps de l'analyse des traces élémentaires, leur apurement et leur transformation en base de déplacements (dans le sens EGT du terme).
- La base finale doit être anonymisée (vœu car difficile à faire en pratique).
- Il y a toujours possibilité technique de flouter les extrémités du déplacement dans toute visualisation (voir les réflexions du CERTU à ce sujet).
- C'est aux financeurs de l'EGT et au CERTU de mieux expliquer à la CNIL qu'il serait dommage de se priver des nouvelles technologies.

³ Rappelons que la non-déclaration de traitement à la CNIL est punie de 5 ans d'emprisonnement et de 300 000 euros d'amende (article 226-16 du code pénal).

3. Technologies et outils informatiques employés

3.1. Le GPS

3.1.1. Généralités

Le Global Positioning System (GPS) est actuellement le seul système opérationnel de positionnement par satellites mondial.

Le système GPS comprend 24 satellites en orbite moyenne (20 000 km, près de 8 km/s, révolution en 12 h) et non en orbite géostationnaire (36 000 km, 3 km/s, révolution en 24 h) selon une croyance répandue. Surveillés par quatre stations terrestres, les 24 satellites dits "défilants" sont distribués de manière à ce qu'au moins 4 satellites soient visibles de n'importe quel point de la Terre et à n'importe quel moment (répartition par groupe de 4 sur 6 plans inclinés à 55° par rapport à l'équateur et écartés de 60° entre eux). Ils émettent en permanence un signal complexe (date et heure, éphéméride, almanach). L'heure d'émission est comptée grâce à l'horloge atomique embarquée d'une précision à la nanoseconde. Un récepteur GPS qui capte les signaux d'au moins quatre satellites peut, en calculant les temps de propagation de ces signaux entre les satellites et en recalant l'horloge non atomique du récepteur (la quatrième inconnue du système d'équations est la distance entre le récepteur et le cercle sur la Terre intersecté par le front d'onde sphérique envoyé par le 4ème satellite), connaître sa distance (le « pseudorange ») par rapport à ceux-ci et, par trilatération (intersection de trois sphères), situer précisément en trois dimensions n'importe quel point placé en visibilité des satellites GPS avec une précision de 15 mètres pour le système standard. Le point remarquable est que le récepteur peut être en mouvement.

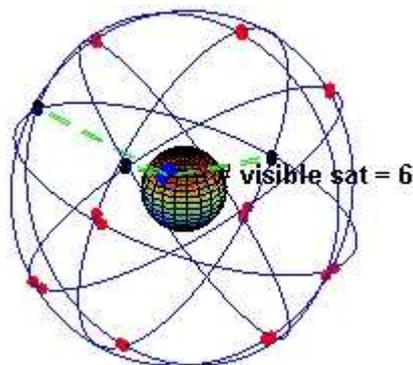


Figure 1 : Constellation des GPS (source : Wikipedia)

A tout instant, le nombre de satellites visibles depuis Paris est entre 6 et 12 (repéré par les axes verts en pointillés sur la figure 1). On peut constater qu'il y a des configurations satellitaires à un instant t plus favorables que d'autres pour résoudre le problème de trilatération.

Concernant cette précision de 15 mètres, le GPS étant un système développé pour les militaires américains, une disponibilité sélective a été prévue à l'origine. Certaines informations, en particulier celles concernant l'horloge des satellites, ont été volontairement dégradées. Pendant de nombreuses années, les civils n'avaient ainsi accès qu'à une faible précision (environ 100 m pour le code C/A, coarse/acquisition, "Selective Availability"). En l'an 2000, le gouvernement américain a annoncé qu'il mettait fin à cette dégradation volontaire du service, permettant une précision d'une quinzaine de mètres (code standard P, précision, désactivation du "SA") et une démocratisation de la technologie au grand public à partir du milieu des années 2000.

Certains systèmes GPS conçus pour des usages très particuliers peuvent fournir une localisation à quelques millimètres près. Le GPS différentiel (DGPS) peut ainsi corriger (en différé) la position obtenue par GPS conventionnel par les données envoyées par une station terrestre de référence localisée très précisément.

3.1.2. Précision des mesures et le "DOP"

La précision de localisation dépend étroitement de la qualité de la mesure du temps et de la position des satellites par rapport au récepteur. Un signal véhiculé par une onde progresse de 3 mètres en 10 nanosecondes (10 milliardièmes de secondes). Il est intéressant de comprendre quelles sont les sources d'imprécision de la localisation par GPS car au cours de l'expérimentation, nous avons rencontré des problèmes de perte de signal ou de déportation ponctuelle à des kilomètres du point attendu.

La précision de localisation dépend :

- des performances des horloges,
- de la synchronisation des horloges des satellites, ce qui nécessite la prise en compte des doubles effets inverses de la relativité restreinte et de la relativité générale,
- de la connaissance du décalage de temps entre l'horloge du récepteur et celle des satellites, sachant qu'une horloge atomique telle que celle embarquée sur le satellite ne peut équiper un modeste récepteur terrestre grand public,

- de la connaissance des paramètres susceptibles d'influer sur la vitesse de propagation des ondes. Par exemple, les radiations de haute énergie de la ceinture de Van Allen présentes en orbite moyenne peuvent rendre les fronts d'onde anisotropes. Il y a aussi des perturbations à la traversée de la couche ionosphérique de l'atmosphère terrestre,
- des positions des satellites dans le ciel par rapport au récepteur. Par exemple, si les satellites reçus sont dans la même direction et au ras de l'horizon, le récepteur aura du mal à localiser correctement le traceur car le résultat de la trilatération sera moins précis. De plus, il y a des effets de réflexion et des effets atmosphériques, la couche ionosphérique à traverser étant plus épaisse à l'horizon qu'à la verticale.
- des sources d'interférences naturelles. Par exemple le phénomène dit de "scintillation" qui ralentit les ondes lors de la traversée des ceintures de Van Allen puis de la couche ionosphérique située entre 80 et 400 km puis de la couche troposphérique entre 0 et 80 km. Il y a aussi les effets des tempêtes magnétiques.
- des sources d'interférence artificielles : amplificateurs d'antennes TV, obstacles métalliques dans les abris-bus, les fenêtres teintées, ...
- du phénomène de réflexion en milieu urbain des signaux ("multipath effect" ou effet canyon) sur les immeubles qui allonge les distances récepteur-satellite.

Le "DOP" (Dilution of Precision) est un paramètre qui permet d'estimer la qualité de la mesure effectuée en fonction de l'azimut (angle par rapport au nord dans un plan horizontal) et de l'élévation ou la hauteur (angle au-dessus de l'horizon) de chacun des satellites. Il existe en fait 5 indicateurs du DOP : GDOP, HDOP, VDOP, PDOP et TDOP, respectivement pour géométrique, horizontal, vertical, position et temps. Quand des satellites visibles sont très proches entre eux dans le ciel (angle de séparation faible), les valeurs du DOP sont élevées. Ainsi, plus faible est le DOP, meilleure est la précision de localisation.

Remarque à propos de la relativité : La relativité restreinte nous apprend qu'une horloge en mouvement marche plus lentement que lorsqu'elle est au repos ("dilatation du temps"). Ainsi, une seconde sur terre mesurée par une horloge au repos vaut 1,0000000009 seconde, soit environ 0.1 ns de plus que si elle était mesurée par une horloge en mouvement uniforme à 4 km/s dans l'espace en tenant compte du facteur de Fitzgerald-Lorentz $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$. Inversement, la relativité générale⁴ nous apprend qu'une horloge sur terre située près d'une masse bat plus lentement qu'une horloge dans l'espace à cause du champ de gravitation créé et il est démontré que ce second effet est plus important que le premier. Ces corrections relativistes ne jouent que sur quelques centimètres à

⁴ Dès 1916, Einstein avait déjà réfléchi au comportement des horloges et des règles de mesure sur un corps en rotation ... "Une horloge placée sur le pourtour d'un disque en rotation marche plus lentement qu'une horloge placée au centre du disque" (Einstein, 1916).

chaque seconde mais sans elles, les dérives peuvent se cumuler dans le temps, par exemple jusqu'à 10 mètres d'erreur après 5 minutes. Il y a un troisième effet relativiste, appelé effet Sagnac, causé par le mouvement du récepteur qui se déplace avec la rotation de la Terre sur elle-même, à 500 m/s s'il est situé sur l'équateur. Cet effet est infime et n'est pas pris en compte dans les algorithmes des traceurs.

3.1.3. Un avenir prometteur pour la précision et les récepteurs GPS

Les États-Unis continuent de développer leur système par le remplacement et l'ajout de satellites ainsi que par la mise à disposition de signaux GPS complémentaires, plus précis et demandant moins de puissance aux récepteurs et autres traceurs GPS.

De son côté, l'Europe disposera bientôt de son propre système de localisation appelé Galileo. Un accord d'interopérabilité a été signé entre les systèmes GPS et Galileo afin qu'ils puissent utiliser les mêmes fréquences et assurer une compatibilité entre eux. Après les missions réussies de démonstration technologique des satellites GIOVE-A (décembre 2005) et GIOVE-B (avril 2008) qui ont embarqué des horloges atomiques (des "PHM", Passive Hydrogen Maser) d'une précision et d'une stabilité inégalées (une nanoseconde par 24 heures), le lancement des 4 premiers satellites opérationnels développés dans le cadre du programme GalileoSat a été effectué en 2010-2011, le lancement des 26 autres satellites devrait suivre en 2012-2013. Restons cependant prudent : les retards accumulés du programme Galileo depuis 10 ans incitent à la prudence quant à sa date de mise en service réelle. Par ailleurs, du côté GPS, le système américain est en pleine rénovation avec le déploiement dit de troisième génération qui est annoncé pour 2015. N'oublions pas aussi le programme russe Glonass qui semble renaître de ses cendres et a aligné son premier nouveau satellite de remplacement, le Glonass-K, le 26 février 2011.

Enfin, la Chine n'est pas en reste avec son programme Beidou. Ainsi, le 26 décembre 2011, la Chine a annoncé l'ouverture de son propre système de navigation par satellite. Il ne couvre actuellement que la Chine et ses pays voisins, mais il est accessible gratuitement. Le réseau devrait cependant s'ouvrir progressivement au monde, les autorités Chinoises ayant programmé le lancement de trente satellites jusqu'en 2020. A cette date Beidou couvrira le monde. En fait, le premier satellite Beidou a été lancé en 2000. Fin 2012, il y aura 16 satellites. La Chine a annoncé que la précision, actuellement de 25 mètres, sera portée à 10 mètres fin 2012. L'usage du réseau sera gratuit, des applications domestiques sont d'ailleurs déjà existantes. Beidou compte déjà plus de 100 000 utilisateurs.

La question essentielle pour l'utilisateur final est le niveau d'interopérabilité entre les différents systèmes GPS américain, GALILEO européen, GLONASS russe et BAIDOU chinois. Il est évident que plus un traceur « voit » de satellites, meilleure sera la précision et faible la dispersion des points parasites en un lieu d'activités.

Remarque à propos de Galileo : Le cahier des charges de Galileo prévoit une précision spatiale de l'ordre de 30 cm, en utilisant au moins deux bandes d'ondes. Cela se fera sans correction différentielle et sans appel à une autre technologie. Le programme Galileo offrira une meilleure couverture que le système américain dans les régions boréales du globe, comme le nord de l'Europe. Galileo et GPS seront compatibles, ce qui permettra d'améliorer la qualité de réception des signaux satellitaires (en « voyant » de manière indifférenciée des satellites Galileo et GPS). Ceci réduira l'effet canyon urbain dans certaines villes aux rues étroites et aux immeubles hauts. De plus, contrairement au GPS américain, Galileo assurera un service civil avec une mise à jour des données toutes les secondes et veillera à l'intégrité des informations fournies pour assurer un service performant et de qualité non dégradée. En pratique, la très grande stabilité de fréquence de l'horloge atomique PHM, 1 nanoseconde par jour contre 10 pour le GPS, permettra d'assurer une localisation au sol à 30 cm près, contre une incertitude de 15 mètres en moyenne pour le système GPS. L'horloge PHM se cale sur la fréquence des changements de spin de l'électron dans l'atome d'hydrogène, qui est de 1,420 GHz. Cette gamme se situe dans les micro-ondes (d'où le terme maser, où le m de microwave remplace le l de light dans laser). On fait réagir l'atome dans une cavité à résonance dite de Ramsey (Nobel de physique en 1989). Cette technologie fournit une précision nettement meilleure que les "vieilles" horloges atomiques au césium-rubidium embarquées dans les satellites du système GPS. Ce gain substantiel en précision spatiale ouvre un horizon presque sans fin d'applications.

3.1.4. Les traceurs GPS

Une première étude de benchmarking des traceurs (ou récepteurs) du marché a été réalisée au début de la recherche en octobre 2009. Une deuxième étude a été réalisée à la fin de la recherche, en décembre 2011, dans le cadre d'une mission proposée à deux élèves-ingénieurs⁵ de Telecom ParisTech.

3.1.4.1. Première étude de benchmarking fin 2009

Avant de choisir le traceur pour l'expérimentation sur les 23 volontaires, nous avons testé quatre traceurs du commerce : IGOTU, Route 66, TrackStick MINI et BT-Q1000X. Ces

⁵ Margaux Penwarden (1^{ère} année) et Yassine Benchrih (2^{ème} année)

traceurs GPS « grand public » visent principalement la géolocalisation agrémentée de photos ou de vidéos. Chacun a des avantages et des inconvénients. Les prix varient de 45 à 257 euros en décembre 2009.



IGOTU



Route 66



TrackStick MINI



BT-Q1000X

Figure 2 : les 4 traceurs testés

Quel est le **cahier des charges** sommaire du traceur idéal pour nos besoins d'enquête ? Il doit :

- pouvoir enregistrer jusqu'à 151 200 points (hypothèse d'un point toutes les 3 secondes 18 heures par jour pendant 7 jours),
- posséder une autonomie d'au moins 7 jours,
- se mettre en veille s'il ne bouge pas au bout de n minutes (n paramétrable),
- avoir une précision spatiale inférieure à 10 mètres,
- avoir un temps de démarrage à tiède le plus court possible (inférieur à 2 minutes, dans le cas où on oublie de l'allumer le matin au réveil), surtout un temps de démarrage à chaud le plus court possible, par exemple en sortant du métro (inférieur à 20 secondes) ou d'un tunnel (inférieur à 2 secondes),
- avoir la taille d'une clé USB que l'on peut porter au cou,
- enfin pouvoir envoyer automatiquement les données à distance vers un serveur d'acquisition.

Les caractéristiques principales d'un récepteur est le nombre de canaux, les temps de démarrage à froid, à tiède et à chaud et la sensibilité. Le nombre de canaux est le nombre de satellites qu'il peut recevoir simultanément. Ce nombre varie de 12 à 20 (certains fabricants annoncent plus). Les fabricants de traceurs GPS annoncent tous un temps de démarrage à froid de 15 minutes (la première utilisation). Après avoir acquis le signal d'un premier satellite, le traceur GPS peut commencer à obtenir des informations des autres satellites, appelées almanach. Cet almanach est transmis pendant 12,5 minutes et peut être considéré comme valide pendant 180 jours. Quant à la sensibilité (qui s'exprime en échelle logarithmique dBmW), elle traduit la rapidité à capter un signal extrêmement faible. Les signaux GPS arrivent sur Terre avec une puissance d'environ -160 dBmW.

IGOTU peut enregistrer jusqu'à 32 000 points mais a une autonomie de 40 heures seulement. Le Route 66 a la taille d'une clé USB et est fourni avec un tour de cou mais il a une faible autonomie (une dizaine d'heures seulement).

Le **TrackStick MINI**, sorti en septembre 2009, remplit quasiment tous les critères (même le capteur tactile) sauf sa capacité d'enregistrement qui est limitée à 16 000 points seulement. C'est le seul à avoir une taille miniature (taille d'une clé USB). Il est résistant à l'eau. Malgré son antenne 360°, il a un temps de démarrage à froid très long ce qui apparaît rédhibitoire, comme son prédécesseur, le SuperTrackStick. Comportant un système de mise en veille qui permet d'économiser la batterie, il a une autonomie d'une à deux semaines selon son taux d'activité. Il capte très mal par temps nuageux ou lorsqu'il fait sombre (en début de matinée ou en fin d'après-midi). Il a l'avantage d'avoir été conçu pour des besoins professionnels (investigation de la police, transport de marchandises, etc), donc on peut penser que tout matériel peut être adapté spécifiquement selon nos besoins si on devait un jour déployer une enquête grandeur nature et passer une commande de type industriel (jusqu'à 3000 unités).

Le quatrième, le **QStarz-BT-Q1000X** dispose d'une puce GPS nouvelle génération (MTK2). Il utilise le système A-GPS qui est un serveur d'assistance ou un réseau de référence pour optimiser les performances classiques d'un traceur GPS en mode autonome en téléchargeant les données d'almanach depuis un serveur d'assistance (le TTFF, Time To First Fix, est nettement réduit). Il faut théoriquement mettre à jour une fois par semaine cet almanach par téléchargement. Le fabricant annonce aussi un contrôle "intelligent" de la consommation, une autonomie de 42 heures dans un environnement rural (en urbain, c'est moins car il y a plus de calculs de géolocalisation en temps réel), une capacité d'acquisition de 66 canaux et une sensibilité de -165 dBmW (contre seulement -159 pour le SiRF III qui équipe le IGOTU et le Route 66).

3.1.4.2. Deuxième étude de benchmarking fin 2011

Après l'expérimentation (voir partie 4), nous avons conclu sur l'inadaptation des traceurs du marché à nos besoins, en particulier en environnement « indoor » et à proximité. Entre 2009 et 2011, de nouveaux traceurs sont sortis sur le marché. On peut trouver aujourd'hui des traceurs GPS capables d'envoyer en temps réel les données d'enregistrement à un serveur à distance. C'est le cas du matériel TR203 de GlobalSat qui est sorti fin 2011, il est encore très cher (300 €). En fait, cette technologie existe déjà depuis longtemps et équipe certaines marques de voitures pour une fonction antivol (voir par exemple l'offre de service de la société américaine OnStar qui permet de bloquer le démarrage à distance et le projet européen eCall).

Nous avons lancé une étude légère de comparaison d'**applications de suivi GPS sur smartphone** pour compléter la première étude sur des matériels grand public réalisée en début de recherche. Le Lab'Urba de l'Université de Paris-Créteil était associé à ce test. On peut en effet envisager d'utiliser les puces A-GPS intégrés dans les smartphones (iPhone, Blackberry, Nexus One, etc). Il existe plusieurs applications sur l'iPhone et l'iPad d'Apple (par exemple, MotionX-GPS, ITrail, tous installés sur iOS) et sur l'OS (Operating System) Android, qui permettent de transformer le téléphone et la tablette en traceurs GPS. L'un des problèmes aujourd'hui est que ces applications sont voraces en batterie (4 heures maximum, un peu plus sur l'iPad).

Quatre applications de géolocalisation ont été testées : **Nao Campus, Insiteo, MotionX-GPS, Open GPS-Tracker**. Le traceur **QStarz-BT-Q1000X** reste le traceur témoin. L'étudiante a porté sur 3 jours (27/11/2011, 29/11/2011 et 2/12/2011) les 5 matériels en même temps. Tous les traceurs ont été paramétrés pour mesurer des positions absolues, l'intervalle d'enregistrement étant fixé à 5 secondes.

1) Nao Campus

C'est une application développée par la société PoleStar, basée à Toulouse, spécialisée en géolocalisation « in-door ». Par exemple, l'application est disponible pour s'orienter au Centre commercial Les 4 Temps à la Défense. La société investit beaucoup dans la recherche et développement pour élargir son champ d'activités à la géolocalisation universelle. L'application Nao Campus a les caractéristiques suivantes :

- Elle est disponible sur Android.
- Elle ne nécessite pas de déploiement spécifique de balises WiFi. Celles déjà présentes sur le site sont réutilisées.

- Les balises n'ont pas besoin d'être reliées à un réseau, le calcul de position s'opérant sur les terminaux utilisateurs, une simple alimentation électrique suffit.
- Pas d'utilisation GPS en indoor
- Robustesse des signaux aux environnements indoor
- Prise en compte des différentes architectures
- Les réseaux WiFi étant asynchrones, ils ne permettent pas d'obtenir des mesures très précises, donc l'algorithme de localisation ne procède pas par triangulation comme pour le GPS, mais effectue une cartographie des puissances de signal à partir de laquelle il est possible de calculer la position relative.

La mise en place d'une application Nao Campus par la société PoleStar nécessite de dérouler les étapes suivantes :

Étape 1: Diagnostic réalisé à partir du plan du lieu fourni par le gestionnaire, le propriétaire ou le développeur de l'application mobile

Étape 2: Création du modèle géographique en 3D

Étape 3: Collecte sur site. Mesure du niveau de puissance reçue à l'endroit où l'on se trouve. C'est le « Fingerprinting ». On calibre la zone étudiée et on effectue des tests préliminaires.

Étape 4: Génération de la Base de données de positionnement NAO®. Traitement des signaux obtenus afin d'avoir des distances plus précises (grâce à des algorithmes de traitement du signal probabilistes).

Étape 5: Validation et contrôle qualité (vérification des performances). Plan de l'étage avec l'altitude absolue.

2) Insiteo

La société Insiteo est également basée à Toulouse et spécialisée dans la géolocalisation « indoor ». Il n'existe pas d'application générale Insiteo. Seules des applications pour des salons passés ou des lieux publics à l'étranger sont disponibles sur Android Market.

La première génération de l'application Insiteo utilise des balises WiFi (hotspots) déployées dans le site (salons, centres commerciaux etc.). Le nombre de bornes WiFi à déployer dépend de la densité WiFi déjà présente. Pour la deuxième génération, Insiteo est en train de mettre au point un boîtier spécifique appelé StarBox, de type « pseudolites » (pseudo-satellite) fonctionnant sur le même principe que les satellites GPS mais en environnement fermé. Ce sont des émetteurs de signaux GPS locaux. Aujourd'hui, plusieurs sociétés proposent cette solution, dont Insiteo et Locata (pour l'outdoor surtout).

Les mesures effectuées avec des pseudolites se font par triangulation (trilatération) comme avec les satellites. Pour avoir un point en 2D (indoor), il faut au moins 3 mesures. En 3D (si

on prend en compte l'altitude, nécessaire si l'on passe d'un étage à un autre), il faut au moins 4 mesures. Toutefois, cette solution n'est pas encore bien exploitée.

Les avantages de cette solution sont :

- la continuité complète entre l'indoor et l'outdoor grâce à la nature identique des signaux reçus,
- la précision inférieure au mètre, parfois proche du centimètre,
- la 3D, réalité augmentée,
- pas de fingerprint/calibration nécessaire,
- moins de dispositif à installer : pour une surface de 60 000 m², il suffit de 3 émetteurs - qui répliquent l'émission satellite - contre une dizaine au moins de bornes d'accès Wifi.

Cependant il subsiste des problèmes :

- les réflexions sur les surfaces, qui sont à l'origine de l'effet canyon (« multipath effect »). Les distances récepteur-pseudolite se trouvent allongées.
- sur les réglementations de fréquence et de puissance émises (la puissance des signaux détectables est trop élevée).

3) MotionX GPS

Cette application payante est disponible sur iPhone et iPad. Elle offre la possibilité de choisir la méthode de positionnement.

En outdoor, on choisit manuellement l'option GPS. On obtient alors une position absolue déterminée par triangulation avec une précision de 10 à 100 m.

En indoor, on choisit manuellement l'option WiFi (sauf si on se trouve près de fenêtres). La position relative affichée est obtenue par triangulation.

4) Open GPS Tracker

Cette application est en open-source sur Android Market. Elle propose très peu d'options. Afin de ne pas épuiser la batterie du téléphone, la précision « normale » de localisation a été choisie. Il n'y a pas d'option de mise en veille.

Résultats

Globalement les deux applications outdoor (MotionX OpenGPS) donnent des résultats mitigés, moins satisfaisants que le QStarz. Les deux ont des temps de démarrage supérieurs au QStarz au départ le matin si le smartphone ou l'iPad restent allumés toute la nuit, alors que le traceur QStarz doit être rallumé le matin. L'application Open GPS Tracker donne des

traces peu précises, capte mal les transitions in-out-in et connaît plus que le MotionX des coupures de signal.

L'application MotionX fonctionne mieux et démarre plus rapidement. On ne peut pas choisir la fréquence d'acquisition.

L'application Insiteo ne fonctionne que sur des sites pré-établis, de même que Nao Campus qui a été testé aux 4 Temps de la Défense. La localisation par Nao Campus fonctionne bien mais l'application **ne permet pas de conserver les traces du cheminement** à l'intérieur du centre commercial. Le tableau 1 présente les caractéristiques principales des applications testées.

	QStarz	MotionX GPS	OpenGPS Tracker	Nao Campus
Puce GPS	MTKII	NC	Broadcom BCM4751	Pas de GPS
Sensibilité	-165 dBm	NC	NC	-80/-90 dBm
Rapidité d'acquisition	Bonne (cf. temps de démarrage) 1 point toutes les 5 secondes/NSAT	Pas de choix de fréquence d'acquisition Choix du mode de transport et/ou de l'assistance accélérométrique Il n'y a pas de fréquence d'acquisition donnée	Toutes les 15 secondes après 10 mètres de mouvement (mode Normal)	Rafraîchissement de l'information jusqu'à 2 fois/s
Autonomie ou mémoire occupée par l'application	42 h	Ipad : Un peu plus d'1 jour (seule application utilisée)	2,07 Mo (Samsung Galaxy S)	6,79 Mo (Samsung Galaxy S)
Capacité de la mémoire	200000 points 4 Mo	400 points 101 parcours	Samsung Galaxy	Information confidentielle
Temps de démarrage à froid (en moyenne)	35 secondes	15 à 20 minutes si le ciel est couvert (ou le matin en hiver)	1-5 minutes	<30 secondes
Temps de démarrage à tiède (en moyenne)	33 secondes	<1 s	Env. 2 s	Pas de démarrage à tiède, car application utilise le WiFi dans le centre commercial
Temps de démarrage à chaud (en moyenne)	1 seconde	env. 5 s	< 5 s (il faut prendre en compte le	Pas de démarrage à chaud, car application utilise le

			temps de démarrage à chaud du téléphone)	WiFi dans le centre commercial
Durée de charge	3 h			
Temps de mise en veille	NC	NC	NC	NC
Précision spatiale outdoor	<3 m	10-100m	20-100 m	Dépend de l'appareil
Précision spatiale indoor	<100m	30m	<100m	3-5 m
Taille	72.2 (L) X 46.5 (W) X 20 (H) mm			
Coût	86 €	1,59€	Gratuite	gratuite
Nombre de canaux ou de bornes Wifi déployées	66	59	NC	dizaine
Accéléromètre (et/ou gyromètre) couplé	Oui	Accéléromètre	Non	Oui
Poids	140g			

Tableau 1 : tableau synoptique de comparaison

3.1.5. Les fabricants de puces GPS

Il faudra tenir compte d'un acteur majeur : les fabricants de puces GPS. Ils doivent innover en permanence et ils se livrent une bataille féroce pour tailler des croupières au principal fabricant américain SiRF qui vient de sortir sa dernière puce, la Star V, en novembre 2011. Selon le fabricant, cette nouvelle puce peut capter les signaux GPS, Glonass, Galileo et Baidou, ainsi que les signaux Wifi (le fabricant déclare qu'il gère sa propre base de données de localisation des bornes Wifi).

Les nouveaux entrants sont Broadcom (puce A-GPS), Nemerix (qui a mis au point la première puce multi-bandes compatible GPS/Galileo/Glonass), U-Blox, Qualcomm (puce gpsONE) et n'oublions pas les grands constructeurs micro-électroniques qui se réveillent : Texas Instruments (puce NavTech), STMicroelectronics, NXP (ex Philips Semi-Conductor), etc. Mais attention, la performance d'une puce GPS ne suffit pas. Son intégration avec l'antenne est également primordiale.

Il y a aussi un autre acteur incontournable : **l'intégrateur ou assembleur**. On en est encore aux balbutiements. C'est à celui qui parviendra à intégrer dans un seul et même boîtier miniaturisé un capteur interopérable GPS-Galileo-Glonass-Baidou, un capteur GSM/GPRS,

un capteur Wifi, des capteurs inertiels, le tout piloté par un algorithme performant de géolocalisation en coordonnées universelles hybridant toutes ces technologies de manière fluide et invisible pour l'utilisateur. L'apport des nanotechnologies dans le futur est également prometteur.

3.2. Le SIG

L'autre outil informatique qui a également fait une percée remarquable dans le domaine des transports depuis une quinzaine d'années est le système d'information géographique (SIG). On ne compte plus les applications des SIG en modélisation de trafic, en calculs d'itinéraires, en études d'analyse territoriales, etc.

L'IAU dispose du SIGR, outil de cartographie et d'analyse spatiale puissant, s'appuyant sur des bases de données géoréférencées très riches. En particulier, la couche MOS (extrait carte 1) est l'inventaire numérique de l'occupation du sol d'Île-de-France et comporte environ 400 000 polygones codés en 83 postes différents (tableau 2).

Pour une variable spatiale telle que « Franchissement du cordon A86 » (qui correspond à une question posée par l'enquêteur dans l'EGT classique afin d'avoir une idée de l'itinéraire), le suivi par GPS et la reconstitution de l'itinéraire sur la couche routes du SIGR permettraient de voir immédiatement et sans ambiguïté si le cordon A86 a été franchi.

Finalement, ce n'est pas tant l'outil qui est important mais les données géocodées disponibles : MOS, réseaux et en particulier le réseau de bus, tunnels, entrées/sorties de gares et métro, arrêts de bus, stations Vélib.

9	EAU FERMÉE (ÉTANGS, LACS...)	Toute surface en eau d'au moins 500 m ² , y compris les étangs des parcs et les nappes des fonds de gravières
10	COURS D'EAU	Tout cours d'eau permanent sans restriction de largeur maximum
11	SURFACES EN HERBE NON AGRICOLES	Les surfaces en herbe non agricoles sont les espaces en herbe associés : - aux infrastructures (délaiés d'autoroute entretenus) - aux terrains de manœuvre militaires - aux abords des pistes d'aérodromes - aux couloirs de lignes à haute tension - aux châteaux ou similaires (grandes pelouses décoratives non arborées)
12	CARRIÈRES, SABLIERES	Toute carrière ou sablière en activité
13	DÉCHARGES	Toute décharge autorisée ou non (les casses de voitures sont classées en entreposage à l'air libre)
14	ESPACES RURAUX VACANTS (MARAIS, FRICHES...)	Zones humides, marais, landes non arborées, friches agricoles, carrières abandonnées, terrains de manœuvres, vergers abandonnés, emprise de déboisement des lignes électriques
15	BERGES	Berges de voies d'eau sans activités portuaires ou de stockage, non bâties et non aménagées en espace vert
16	PARCS LIÉS AUX ACTIVITÉS DE LOISIRS	Il s'agit des parcs animaliers, zoos, parc d'attraction (réservé aux aires de loisirs non bâties), centres de loisirs sans hébergements. Les aires de loisirs proprement dites sont distinguées des parkings, équipements hôteliers, espaces boisés, ...
17	PARCS OU JARDINS	Concerne les parcs et jardins (publics ou privés) dont la superficie est supérieure à environ 5000 m ² . Dans le cas d'une très grande propriété dont une partie est boisée, les diverses composantes sont dissociées (en bois, parc, eau, ...)
18	JARDINS FAMILIAUX	Il s'agit de jardins, vergers, potagers sur des parcelles indépendantes de l'habitat d'usage familial et non de production agricole
19	JARDINS DE L'HABITAT INDIVIDUEL	Jardins d'agrément, potagers ou vergers liés à l'habitat individuel et d'une superficie inférieure à 5000 m ² et supérieure à 1000 m ² environ par parcelles
20	JARDINS DE L'HABITAT RURAL	Jardins d'agrément, potagers ou vergers liés à l'habitat rural et d'une superficie inférieure à 5000 m ² et supérieure à 1000 m ² par parcelle. Les jardins hors agglomération avec abris, cabane, etc. sont classés dans ce thème
21	JARDINS DE L'HABITAT CONTINU BAS	Jardins d'agrément, potagers ou vergers liés à l'habitat et d'une superficie inférieure à 5000 m ² et supérieure à 1000 m ² par parcelle. Les jardins potagers des châteaux et ceux des écoles sont à ce poste
22	TERRAINS DE SPORT EN PLEIN AIR	Terrain en plein air autres que tennis (terrains de football, athlétisme, rugby, etc.)
23	TENNIS DÉCOUVERTS	Tout terrain de tennis identifié par photo-interprétation, qu'il soit public ou privé
24	BAIGNADES	
25	CAMPING, CARAVANING	Terrain de camping et de caravaning, y compris les parcs résidentiels avec mobil-home. Les caravanes isolées implantées sur un lotissement individuel de manière permanente seront classées dans la rubrique "habitat autre"
26	PARCS D'ÉVOLUTION D'ÉQUIPEMENTS SPORTIFS	Il s'agit des pistes de rollers et des pistes de cross. Le circuit CAROL est référencé dans ce poste. Les stands de tir découverts.
27	GOLFS	
28	HIPPODROMES	
29	TERRAINS VACANTS EN MILIEU URBAIN	Terrains vagues en milieu urbain, terrains libres, non bâtis
30	HABITAT INDIVIDUEL	Lotissements et constructions individuelles. Si la parcelle a plus de 1000 m ² ne prendre en compte que les bâtiments plus une bande de 10 m et rattacher si possible à la voirie
31	ENSEMBLES D'HABITAT INDIVIDUEL IDENTIQUE	Ensemble d'habitations réalisé par un même promoteur, maisons le plus souvent identiques et disposées régulièrement.
32	HABITAT RURAL	Il s'agit de groupements de bâtiments espacés de moins de 100 m majoritairement de forme rurale de 1 à 2 niveaux, exceptionnellement 3, édifiés en continuité les uns des autres, formant un noyau bâti, comportant dans sa partie centrale un point de convergence ou un point particulier (monument, église, ...) incluant des bâtiments de ferme (...) comportant une structure de voirie dont la faible largeur et le tracé témoignent d'une voirie d'origine villageoise. Les châteaux seront classés en habitat continu bas pour le bâtiment lui-même et en village pour les dépendances.
33	HABITAT CONTINU BAS	(R+1 à R+3) Les zones concernées sont surtout linéaires, en bordure de voirie dans les faubourgs et les centres anciens et dans les nouveaux quartiers "maisons de ville". Les châteaux (sauf ceux ouverts au public).

34	HABITAT COLLECTIF CONTINU HAUT	(R+4 à R+7) Il s'agit de centres urbains (immeubles haussmanniens ou ceux en brique de l'immédiat après-guerre), s'il y a des jardins dans ces zones, les traiter en espaces verts
35	HABITAT COLLECTIF DISCONTINU	(R+4 à R+12 et plus) Ensembles relativement récents. La zone concernée par l'emprise de ce type d'habitat sera cernée. Seront indiqués à l'intérieur, les parkings, les espaces verts, commerces, aires de jeux faisant partie intégrante de l'ensemble et repérés en tant que tels.
36	PRISONS	
37	HABITAT AUTRE	Il s'agit essentiellement des hôtels (hors zone d'activité), les auberges de jeunesse, centres d'accueil, centre de vacances et de loisirs, foyer de travailleurs et d'étudiants, couvents, séminaires, maisons de retraite, habitat précaire ou mobile (caravanes ou mobil-homes isolés)
38	ACTIVITÉS EN TISSU URBAIN MIXTE (industrie, entrepôts, atelier, laboratoire, ...)	Activités à caractère industriel (en locaux d'activités, laboratoires, entrepôts, ateliers...) dispersées dans des zones d'habitat, formant ainsi un tissu mixte, mais qui sont individualisées par rapport à l'habitat.
39	GRANDES EMPRISES D'ACTIVITÉ	Emprise affectée à l'activité d'une seule entreprise, de type industriel. L'emprise peut couvrir plusieurs îlots entiers. Les parkings et grands espaces vacants sont repérés comme tels.
40	ZONE ET LOTISSEMENT AFFECTES AUX ACTIVITES	Activités regroupées sur un territoire propre issu d'un développement spontané (ex : Plaine Saint-Denis) ou programmé (dans le cadre d'un lotissement ou d'une ZAC), par exemple la zone d'activités de Paris Nord II ou la zone d'activités de Courtaboeuf.
41	ENTREPOSAGE A L'AIR LIBRE	Zones de stockage de voitures neuves, de caravanes, de matériaux de construction, scieries, casses de voiture, y compris les zones portuaires.
42	ACTIVITÉ DE PRODUCTION ANIMALE	Se trouvent classés dans ce poste : chenils, haras, installations avicoles, etc.
43	CENTRES COMMERCIAUX	Établissements dont la surface commerciale est supérieure à 5000 m ² . Il peut s'agir de centre commercial régional ou local. La zone entière est cernée à l'exclusion des parkings, espaces verts repérés comme tels
44	HYPERMARCHÉS	Établissement dont la surface de vente est supérieure à 2500 m ² . La zone entière est cernée à l'exclusion des parkings, espaces verts repérés comme tels
45	GRANDS MAGASINS	
46	STATIONS-SERVICE	
47	AUTRES COMMERCES	Supermarchés, magasins populaires, commerce spécialisé. Les établissements concernés ont une surface de vente comprise entre 400 et 2500 m ² .
48	BUREAUX	Les bureaux sont indiqués dans la limite du possible
49	INSTALLATIONS SPORTIVES COUVERTES	Installations sportives couvertes y compris les tennis et les stands de tir couverts
50	CENTRES ÉQUESTRES	
51	PISCINES COUVERTES	
52	PISCINES EN PLEIN AIR	
53	AUTODROMES	
54	ENSEIGNEMENT DE PREMIER DEGRE	Écoles maternelles, primaires du secteur public ou privé
55	ENSEIGNEMENT SECONDAIRE	Établissements du secteur public ou privé
56	ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR	Établissements du secteur public ou privé
57	ENSEIGNEMENT AUTRE	
58	HÔPITAUX, CLINIQUES	Hôpitaux publics ou privés, cliniques
59	AUTRES ÉQUIPEMENTS DE SANTÉ	Dispensaires, instituts médico-pédagogiques, centres de PMI et autres établissements de santé
60	CIMETIERES	
61	MAIRIES	
62	MARCHES PERMANENTS	
63	LIEUX DE CULTE	
64	GRANDS ÉQUIPEMENTS CULTURELS	Musées, certaines bibliothèques, les châteaux ouverts au public.

65	ÉQUIPEMENT DE PROXIMITÉ	Crèches, locaux municipaux annexes, centres d'action sociale, locaux d'activité socio-éducative, MJC, conservatoire, écoles d'art, les bibliothèques municipales, bâtiments d'activité de loisirs, bureaux de poste, centre de tri PTT, autres équipements locaux.
66	SIÈGE D'ADMINISTRATION TERRITORIALE	Préfectures, sous-préfectures, les conseils généraux, les sièges d'administrations départementales.
67	ÉQUIPEMENT DE MISSION SECURITE CIVILE	commissariats, gendarmeries, casernes de pompiers
68	INSTALLATIONS RADIO-ÉLECTRIQUES	
69	ADMINISTRATIONS AUTRES	Immeubles de bureaux ou d'activités de grandes administrations, DDE, DDA, DASS, cadastre, sécurité sociale, ministères, ambassades, grandes installations publiques y compris militaires, ainsi que les écluses
70	PRODUCTION D'EAU	Usines d'eau potable, châteaux d'eau, aqueduc
71	ASSAINISSEMENT	Usines de traitement des eaux usées
72	ÉLECTRICITÉ	Postes de transformation, usines de production
73	GAZ	Installations de stockage
74	PÉTROLE	Installations de production, raffinage et stockage
75	INFRASTRUCTURES AUTRES	Usines de traitements de déchets, centrales thermiques, chaufferies urbaines...
76	EMPRISES DE TRANSPORT FERRÉ	Faisceaux de triage, les gares, les installations d'entretien du matériel, voies ferrées y compris les remblais et déblais.
77	AUTOROUTES	Autoroutes, y compris les bretelles d'accès, les talus de remblais et déblais, les échangeurs en entier.
78	VOIES DE PLUS DE 25M D'EMPRISE	Voies à caractère non autoroutier, d'une largeur > 25 m d'immeuble à immeuble, réservé en principe à la ville.
79	PARKINGS DE SURFACE	Tous les parkings de surface, avec une emprise propre, à l'exclusion des parcs souterrains. Ce poste comprend les parkings associés aux équipements et à l'habitat
80	PARKINGS EN ÉTAGES	Tous les parkings en étages, avec une emprise propre, à l'exclusion des parcs souterrains. Ce poste comprend les parkings associés aux équipements et à l'habitat
81	GARES ROUTIÈRES, DÉPÔTS DE BUS	Gare routière, d'autobus, d'autocar pour voyageurs. Les installations de transport de marchandises sont repérés dans les activités de stockage. Ce poste inclut les dépôts d'autobus RATP
82	INSTALLATIONS AÉROPORTUAIRES	Seules l'aérogare, les installations techniques (hangars,...) et les pistes sont dans ce thème. Les parkings, surfaces en herbe, installations industrielles, et entrepôts sont repérés comme tels.
83	CHANTIERS	Il s'agit de tous les chantiers de construction et de démolition

Tableau 2 : nomenclature du MOS en 83 postes

3.3. Le système-expert

3.3.1. Définition

Le troisième outil est le Système expert. Très à la mode au début des années 90, un peu tombé en désuétude depuis, il présente des concepts très intéressants pour notre recherche. D'une manière générale, un système expert est un outil capable de reproduire les mécanismes cognitifs d'un expert dans un domaine particulier. Il s'agit de l'une des voies tentant d'aboutir à l'intelligence artificielle. Plus précisément, un système expert est un

logiciel capable de répondre à des questions, en effectuant un raisonnement à partir de faits et de règles connus. Il peut servir notamment comme outil d'aide à la décision.

Un système expert se compose de 3 parties :

- une base de faits : les éléments connus dans le domaine
- une base de règles : les interactions, les possibilités, les impossibilités : si [x] alors [y] ou [z] mais pas [t].
- un moteur d'inférence : il est capable d'utiliser faits et règles pour produire de nouveaux faits, jusqu'à parvenir à la réponse à la question experte posée. Par exemple : une fois reconnu qu'un mode est en surface, comment distinguer, uniquement par des points GPS transmis toutes les n secondes, si le déplacement est effectué en mode VP, moto, bus, tramway, vélo ou marche ? Il faudra pour cela utiliser **en première intention** la technique du "map-matching" avec les couches des différents modes comprises dans le SIGR (réseau des lignes de bus par exemple) puis, pour lever les ambiguïtés, les caractéristiques cinématiques moyennes (vitesse, accélération, temps d'arrêt) de chaque mode à différentes périodes de la journée.

Notons qu'à Cincinnati (Etats-Unis) où a eu lieu la première enquête intégrale au monde par GPS, ce n'est pas un système expert qui a été utilisé mais un réseau de neurones artificiel. Cet outil est l'autre grande branche de l'intelligence artificielle et est basé sur l'apprentissage (par exemple par l'algorithme de rétropropagation du gradient) et non l'injection de faits et de règles dans la base.

A proprement parler, il ne s'agit pas de développer un système expert dans son acception informatique mais disons un logiciel pseudo-système expert qui sera fondé sur la philosophie et le but d'un système expert : remplacer l'expert humain qui a une connaissance organisée de manière non séquentielle et non hiérarchisée, qui raisonne à partir d'heuristiques, contrairement à un empilement de syllogismes⁶. Une piste à explorer serait la **statistique bayésienne** (probabilités conditionnelles sur les règles) et les réseaux bayésiens (Pearl, 1985) mais elle n'est pas facile à mettre en œuvre. Elle n'a pas été retenue dans cette recherche.

⁶ Nous n'utiliserons donc pas le jargon des informaticiens et cognitivistes des années 80 qui parlaient de raisonnement en chaînage avant, arrière, mixte, de métarègles, de logique d'ordre 0, 0+, 1, etc. Par exemple, le principe de la méthode de chaînage avant est :

BEGIN : Sélection de la (ou des) règle(s) applicable(s) → CHOIX DE LA REGLE → Déclenchement de la Règle → RETURN to BEGIN

3.3.2. Les ambiguïtés

La détection automatique des variables se heurte à plusieurs difficultés :

- La perte de signal lors des transitions in-out-in.
- L'identification des lieux d'activités (Gambis, 2010). C'est un des problèmes les plus difficiles dans les algorithmes d'inférence. Les anglo-saxons parlent des “**points d'intérêts**” (Points Of Interests, POIs) : domicile, travail, cinéma, boulangerie, etc. Dans le vocabulaire EGT, on parle de **motif** ou encore de lieu d'activités. Ces POIs ne doivent pas être confondus avec des arrêts sur l'itinéraire : par exemple, un arrêt à un feu rouge, une attente à un arrêt de bus. Mais un arrêt de quelques secondes à une boîte aux lettres pour y déposer un courrier ou un arrêt de type « kiss and go » pour déposer une personne à la gare est considéré comme un POI. C'est là toute la difficulté de l'imputation automatique par un logiciel système-expert.
- L'accumulation de points parasites autour d'un lieu d'activités, noyant les traces valides correspondant à un trajet (un rabattement ou une diffusion à pied) ou même à un déplacement très court (aller à la boulangerie située à 20 mètres du domicile).
- La durée minimale d'une activité (le « dwell-time » comme disent les anglo-saxons). Il semble se dégager un consensus pour prendre comme durée minimale **deux minutes** mais dans ce cas on perd les déposes minutes, le déposé dans la boîte aux lettres, etc.
- La distinction entre mode conducteur et mode passager.

3.3.3. Le logiciel système-expert G-TO-MAP

Développé par l'Université de Sydney (Greaves, 2011) depuis une dizaine d'années, le logiciel G-TO-MAP (GPS Trips, Occupancy, Mode And Purpose) est le premier réellement opérationnel. Il a été utilisé dans les enquêtes de Cincinnatti et de Sydney. Il cherche à traiter de manière la plus automatisée possible les problèmes suivants :

- le volume de données (millions de points)
- les points parasites ou invalides (« spurious data »)
- les pertes de signal à l'origine et à la destination d'une partie des déplacements (les transitions in-out-in)
- la détection automatique des heures de départ, d'arrivée, des modes (le mode de chaque trajet d'un déplacement) et des motifs à l'origine et à la destination, en 4 étapes : pré-traitement, identification des déplacements, détection des modes, détection des motifs (figure 3).

Écrit en Python, il utilise les plateformes GISDK, TransCAD et Google Earth pour l'édition et la visualisation des déplacements. Il combine une série de procédures automatisées avec quelques traitements manuels pour la deuxième étape d'identification des déplacements. Pour les modes et motifs, il utilise des règles et heuristiques basées en partie sur un système d'information géographique.

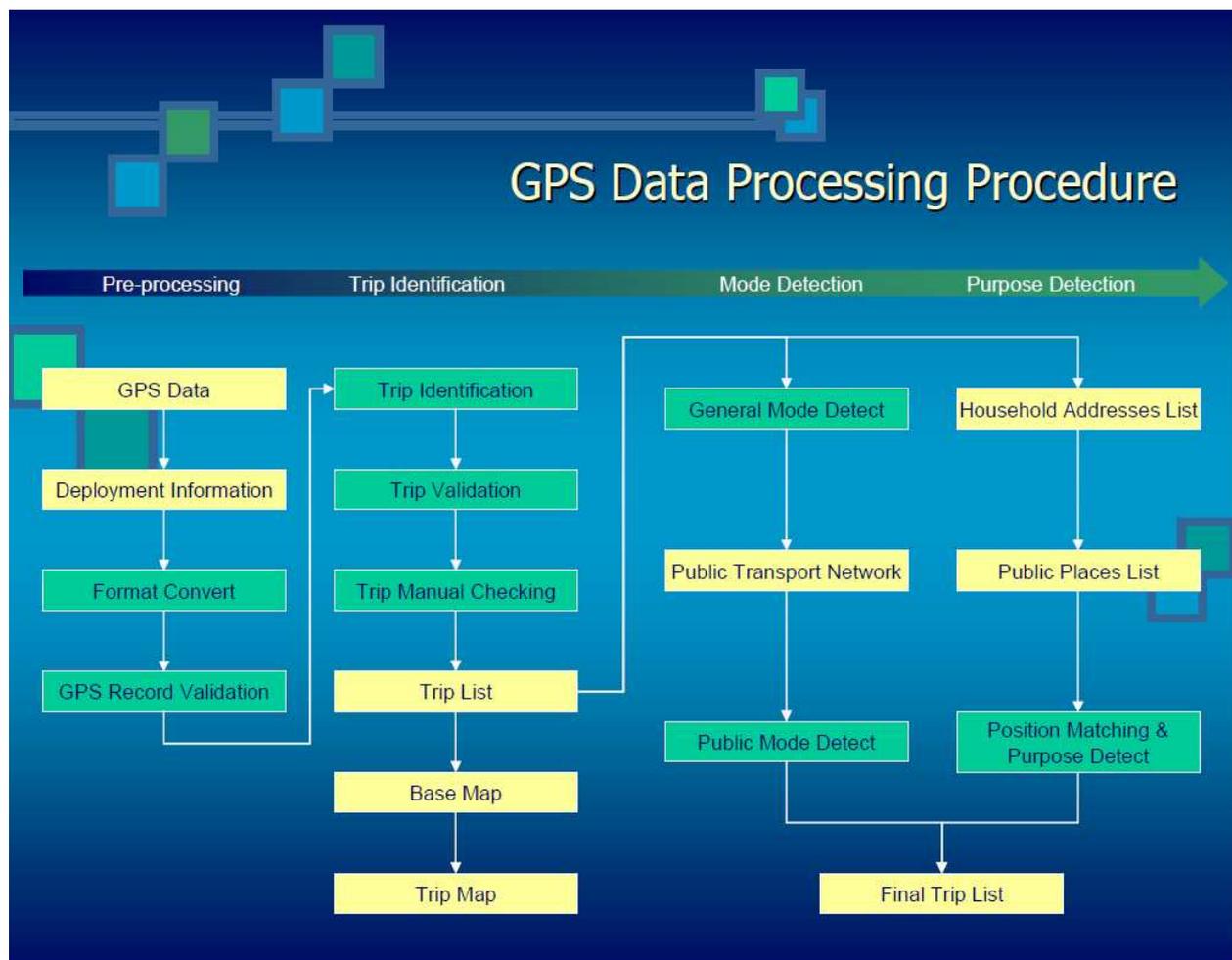


Figure 3 : Schéma de traitement des données GPS (Source : Greaves, 2011)

3.3.3.1. Pré-traitement

C'est la première étape (« pre-processing » sur la figure 3). Elle est composée d'un ensemble de routines qui convertissent les données brutes GPS dans un format adéquat et effectuent un apurement des données, c'est-à-dire extraient les points valides selon les critères suivants :

- HDOP (horizontal dilution of precision) ≤ 5 ,
- Chaque point doit avoir été positionné par au moins 4 satellites,

- La vitesse GPS maximum est de 130 km/h et l'indicateur « distance parcourue/temps écoulé » est inférieur à 250 km/h
- Exclusion des points en dehors de l'aire d'étude
- Latitude et longitude à l'intérieur de l'aire d'étude

3.3.3.2. Identification des déplacements

Les règles suivantes sont appliquées :

- Identification d'une origine ou d'une destination lorsqu'il n'y a pas de mouvement au bout de 2 minutes (dwell-time retenu)
- Identification spécifique des arrêts courts de type dépose minute (accompagnement ou aller chercher), etc
- Identification des points parasites en examinant les variables de vitesse, durée, distance entre points. Remplacement de ces nuages par un point unique représentant l'extrémité du déplacement.
- Comparaison des traces entre les membres d'une même famille. A ce stade, assistance manuelle sur l'interface graphique du logiciel. Ces informations peuvent aider à corriger manuellement les variables inférées automatiquement.
- Identification des différents trajets au cours d'un déplacement en détectant les changements de vitesse (routine pas encore opérationnelle début 2012).

En sortie de cette phase, on obtient un fichier Excel reprenant pour chaque déplacement les heures de départ et d'arrivée, les points de départ et d'arrivée, la durée, la distance, la vitesse moyenne. Ces traces « propres » des déplacements peuvent être visualisées sur Google Earth pour un contrôle visuel.

Les auteurs (Greaves, 2011) soulignent que les algorithmes ne sont pas sûrs à 100% et **qu'une étape de vérification manuelle** est indispensable :

- Identification et suppression des trajets parasites
- Suppression des très courts trajets de rabattement au parking
- Insertion des trajets pour assurer la continuité du signal
- Insertion d'un point d'arrêt ou d'un changement de mode lorsqu'il n'a pas été détecté par le logiciel.

Le taux de correction manuelle n'est pas donné par les auteurs mais il peut être estimé entre 20 et 25% sur l'ensemble des points, ce qui n'est pas négligeable.

3.3.3.3. Détection des modes

Cette étape requiert l'utilisation des réseaux de transport d'un SIG. Les inférences sont basées sur la vitesse, accélération/décélération et la vérification visuelle avec les couches transports selon les modes :

- Marche : vitesse faible, ne suit pas nécessairement le réseau routier.
- Train : infrastructures linéaires au sol
- Bus : vitesse, nombre d'arrêts, itinéraire
- Vélo : possession d'un vélo, vitesse/accélération/décélération, vitesse moyenne du déplacement
- Véhicule particulier : ce qui reste

Remarque : Il nous semble que le logiciel ne met pas suffisamment en œuvre **en première intention** la technique de map-matching (croisement du buffer le long des points GPS reliés par une ligne orientée avec les graphes transport), ce qui nous paraît essentiel. Par exemple, le mode VP peut être détecté aisément en croisant avec le réseau routier, avec une ambiguïté possible entre la VP, les deux-roues motorisés et le bus en centre-ville.

Résultats de l'algorithme :

- Marche : en général, la prédiction la plus fiable.
- Train : perte du signal lors de la traversée des tunnels, et dans certains cas perte du point final de destination.
- Bus : tendance à surestimer ce mode. La détection dépend hautement de la qualité du graphe réseau de bus du SIG.
- Vélo : tendance aussi à surestimer ce mode aux dépens du mode VP.

Les résultats de l'enquête de Cincinnatti suggèrent un taux de détection de 80% des modes mais il faut savoir que la part modale est de 90% en faveur de la VP.

3.3.3.4. Détection des motifs

L'algorithme a besoin d'informations exogènes pour tourner : adresse du domicile, du lieu de travail, du lieu d'enseignement et des deux lieux de commerces les plus fréquentés. Un processus hiérarchique examine successivement : la présence des lieux déclarés à l'intérieur d'un cercle de 200 m centré sur le point de destination, la localisation du lieu public le plus proche, le changement de mode par une modification substantielle de la vitesse puis

les motifs « accompagnement/aller chercher » par une modification du taux d'occupation du véhicule.

Résultats de l'algorithme :

Les auteurs annoncent que le logiciel fonctionne efficacement. Le seul problème réside dans la qualité de la base de données des adresses postales. Des problèmes sont relevés concernant des individus qui garent leur véhicule à plus de 200 m du lieu d'activité.

3.3.3.5. Nécessité d'une enquête de suivi

Il est devenu évident que **le logiciel seul ne suffit pas** à inférer automatiquement tous les attributs d'un déplacement. Il est nécessaire de demander à l'enquêté, d'une manière ou d'une autre, de confirmer ou d'infirmer des informations déduites par le système-expert. Il s'agit maintenant de rechercher le moyen le plus efficace pour avoir ce complément de la part des enquêtés : une enquête sur internet ou une enquête téléphonique ? Il faut tenir compte de la capacité très variable des individus à reconnaître des lieux sur des cartes et du fardeau (« burden » comme disent les anglo-saxons) imposé à l'individu que constitue une enquête de suivi, quelle qu'elle soit.

3.3.3.6. Conclusions

Les chercheurs de l'Université de Sydney ont commencé la recherche et le développement d'un logiciel système-expert il y a près de 10 ans à l'Université de Sydney. Ils constatent aujourd'hui que la **phase de vérification manuelle reste toujours indispensable** et que sa volumétrie est difficile à estimer en moyens humains (homme*jour).

En fait, les facteurs limitants ne sont pas tant dans les algorithmes d'inférence mais plutôt dans la qualité des données GPS en amont d'une part, et dans la disponibilité des couches géographiques du SIG (réseau de bus, entrées/sorties du métro, les tunnels, etc) d'autre part. Ils se demandent aujourd'hui si cela vaut la peine de poursuivre les développements algorithmiques de post-processing pour augmenter à la marge les taux d'inférences correctes et au risque de basculer dans la recherche purement académique, ou bien s'il ne vaudrait pas mieux porter l'effort désormais sur la manière de mieux confronter l'individu à ses propres traces GPS et donc mieux intégrer l'enquête de suivi ?

Sur ces questions, notre recherche propose des **solutions technologiques**, imaginées grâce aux enseignements tirés de notre expérimentation de 2010 présentée dans la partie 4.

3.4. Autres technologies à intégrer

Nous présentons de manière succincte quelques technologies intéressantes qui pourraient être intégrées à un traceur GPS adapté à nos besoins pour améliorer ses performances.

3.4.1. Les signaux Wifi

Le Wi-Fi (contraction de Wireless Fidelity) est un ensemble de protocoles de communication sans fil permettant de relier tout type de périphérique à une liaison haut débit (11 Mbps ou supérieur) sur un rayon de plusieurs dizaines de mètres en intérieur (20-50m) à plusieurs centaines de mètres en environnement ouvert. Ces signaux locaux pourraient être utilisés comme **relais aux signaux GPS** lors de coupures du signal pendant les transitions intérieur-extérieur-intérieur, ce qui permettrait d'assurer une continuité du signal GPS. Mais la localisation est relative et non absolue contrairement aux signaux GPS. Il y a actuellement tout un pan de recherche et développement pour combiner les signaux GPS et les signaux locaux afin d'aboutir à une localisation « augmentée ».

Dans les lieux publics, les zones d'accès Wi-Fi sont appelés « hotspots ». SFR expérimente actuellement dans trois départements français (Alpes Maritimes, Bouches du Rhône, Var) un nouveau service : Auto Connect WiFi. Ce service permet le basculement automatique de la 3G au Wifi, de manière invisible et fluide pour l'utilisateur. Dès que le smartphone de l'utilisateur détecte une borne SFR WiFi, il bascule automatiquement dessus. Ce nouveau service ne permet cependant pas de basculer automatiquement sur son WiFi privé lorsque l'on est chez soi. SFR indique par ailleurs avoir travaillé avec Apple pour que ce nouveau service soit directement géré par l'iPhone 5 sans application tierce. Le lancement d'Auto Connect WiFi sur les 4 millions de hotspot WiFi SFR dans toute la France devrait intervenir rapidement, par vagues successives. La question est de savoir si une application de suivi GPS sur smartphone pourrait utiliser l'infrastructure existante des bornes Wifi pour s'hybrider avec les signaux Wifi.

Les signaux Bluetooth sont d'autres signaux locaux. La RATP teste une technologie appelée BlueEyes qui permet la localisation par technologie Bluetooth dans le métro parisien. Il est

destiné aux mal-voyants mais on peut imaginer une extension de son application comme relais du GPS. Enfin, une autre technologie pourrait dans un futur plus lointain supplanter le Wi-Fi : la transmission par la lumière, désignée Li-Fi (Light Fidelity).

Voir : <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/67711.htm>

3.4.2. Les capteurs inertiels

Les capteurs inertiels (MEMS : MicroElectroMechanical Systems) sont devenus une technologie indispensable dans l'univers des télécommunications. Ils permettent aux smartphones, tablettes et autres consoles de jeux de repérer les mouvements de leur utilisateur. Un des leaders sur le marché est la société franco-italienne STMicroelectronics. Ce sont ces capteurs qui permettent aux terminaux de reconnaître l'inclinaison et d'afficher ainsi l'image tantôt en mode paysage, tantôt en mode portrait, de jouer aux jeux de course de voitures en se servant de sa tablette ou de son smartphone comme d'un volant, ou encore de secouer son appareil pour éteindre sa musique ou passer en mode silencieux, à condition évidemment de télécharger l'application dédiée. Les capteurs inertiels intégrés dans un traceur GPS permettraient de limiter l'enregistrement des signaux GPS aux seuls mouvements. En effet, un des problèmes principaux rencontrés dans le suivi des déplacements est l'enregistrement de point parasites centrés sur un lieu d'activité. Par exemple, si l'on est assis dans son bureau, le traceur GPS continue à capter, alors que ces points sont inutiles pour une EGT. Il faudrait donc que le traceur n'enregistre pas s'il y a « peu » de mouvements, ce qui peut être traité par un filtrage de type Kalman. Par ailleurs, il paraît essentiel pour les besoins d'une EGT qu'un capteur inertiel, quel qu'il soit, ne doit pas être encombrant donc il doit être miniaturisé (Gillieron, 2008).

On distingue comme capteurs inertiels les accéléromètres, gyromètres, magnétomètres et pedomètres.

3.4.2.1. Les accéléromètres

C'est un dispositif mesurant les accélérations et les décélérations linéaires. La plupart des accéléromètres sont constitués de matériaux ayant des propriétés piézo-électriques, qui se chargent électriquement sous l'effet d'une déformation.

Deux types d'accéléromètres sont commercialisés :

- monoaxial (mouvement du tronc selon l'axe vertical),

- triaxial (mouvement selon trois axes). Ce dernier est en réalité souvent composé de trois accéléromètres monoaxiaux.

Un accélérateur triaxial devrait être capable de rendre compte d'un tel mouvement plus précisément mais est globalement moins fiable qu'un accéléromètre monoaxial. Même pour des mesures ambulatoires, un accélérateur monoaxial ne permet pas de bien distinguer la marche de la course à pied

Les accéléromètres sont couramment utilisés lors d'études sur l'activité physique d'une population. En effet, les variations de vitesse mesurées sont proportionnelles à la force musculaire exercée et, par suite, à l'énergie dépensée. La société Apple a innové dès 2007 en intégrant un accéléromètre dans son premier iPhone.

3.4.2.2. Les gyromètres

Un gyromètre (ou gyroscope) est un instrument qui mesure une vitesse angulaire. Il peut être utilisé en association avec des accéléromètres, pour déterminer la position, la vitesse et l'altitude d'un véhicule.

En 2009, l'iPhone 3GS se dote d'une boussole, avant qu'en 2010, l'iPhone 4 intègre un gyromètre permettant de repérer la rotation de l'objet. Cette avancée est présente dans l'iPad 2. Depuis, la majorité des fabricants de smartphone a adopté cette technologie. La gamme Galaxy S ou Galaxy Tab de Samsung, le dernier téléphone Lumia de Nokia, les tablettes d'Asus, la gamme Iconia d'Acer... Tous, à l'exception des BlackBerry de RIM, intègrent ces puces.

3.4.2.3. Les magnétomètres

Un magnétomètre est un appareil qui sert à mesurer un champ magnétique. Il existe deux types de magnétomètres :

- les magnétomètres vectoriels, qui mesurent l'amplitude du champ dans une direction donnée,
- les magnétomètres scalaires, qui mesurent seulement l'amplitude du champ en valeur absolue. Ces capteurs peuvent atteindre une bonne précision et sont isotropes.

Certains appareils de géolocalisation intègrent des magnétomètres qui mesurent le champ terrestre, ce qui permet d'apporter des informations supplémentaires sur le positionnement global. En effet, l'association de magnétomètres et d'accéléromètres conduit à un dispositif sensible à la fois aux mouvements de rotation dans le plan horizontal (magnétomètre) et aux mouvements d'inclinaison par rapport à la verticale (accéléromètre).

3.4.2.4. Les pedomètres

Un pedomètre donne le nombre total de pas en 24h. Certains calculent la distance parcourue et l'énergie dépensée. La plupart sont fiables. Cependant il distingue mal la course à pied de la marche et ne peut mesurer ni l'intensité, ni la fréquence, ni la durée.

3.4.3. Le GSM/GPRS

Dans les enquêtes de Cincinnatti et de Sydney, les traceurs sont récupérés au bout de trois jours d'enquête. Pour nous, l'EGT par GPS se déroulerait sur une semaine. Il faudrait trouver un moyen de transmettre les données GPS à la fin de chaque journée pour permettre l'analyse des traces dès le lendemain et l'enquête de suivi dans la foulée. Pour ce faire, la technologie GSM/GPRS peut répondre à ce besoin sans investissement lourd.

Le réseau GSM a pour premier rôle de permettre des communications entre abonnés mobiles (GSM) et abonnés du réseau téléphonique commuté (RTC - réseau fixe). Il se distingue par un accès spécifique : la liaison radio.

Le réseau GPRS vient ajouter un certain nombre de services sur le réseau GSM sans changer le réseau existant. Le service GPRS fonctionne comme un réseau à transmission de données par paquets avec un accès radio et des terminaux mobiles. La transmission par paquet permet d'économiser la ressource radio: un terminal est susceptible de recevoir ou d'émettre des données à tout moment sans qu'un canal radio soit monopolisé en permanence comme c'est le cas en réseau GSM. Le débit de données sur un réseau GPRS est 5 à 10 fois supérieur au débit maximum théorique d'un réseau GSM qui est de 9,6 Kbit/s. Cette technologie donne un avantage certain aux smartphones par rapport aux traceurs GPS grand publics. En effet, les smartphones sont par définition déjà équipés de puces GSM/GPRS.

3.5. Les smartphones

Le marché des smartphones équipés de A-GPS en série connaît une croissance annuelle à deux chiffres. D'ici 1 an, on ne parlera plus de "smartphone" mais simplement de portable car tous les téléphones vendus en seront. Il y a aussi les tablettes, qui sont finalement des smartphones à très grand écran.

Une application de géolocalisation et de tracing sur smartphone présente de **nombreux avantages par rapport à un traceur GPS du commerce.**

D'abord la plupart des smartphones **assemblent** déjà les technologies et périphériques de communication adaptés aux besoins de l'EGT : micro-processeur A-GPS, micro-processeur GSM/GPRS, micro-processeur Wifi, micro-processeur Bluetooth, les antennes, capteurs inertiels. Ce qui manque pour résoudre les problèmes de l'EGT par GPS, c'est une application de tracing qui fait converger et tire parti de toutes ces technologies de manière intégrée sans nécessiter d'équipements spécifiques, et permet d'obtenir des enregistrements propres et continus et de manière fluide et invisible pour l'utilisateur.

Ensuite l'application est **évolutive**. Ce n'est que du logiciel, contrairement à un traceur GPS spécifique pour lequel l'algorithme doit être codé sur du « hardware » et donc non modifiable facilement.

Enfin, on oublie rarement son téléphone portable alors qu'un traceur spécifique

L'inconvénient à première vue est le manque d'autonomie des batteries actuelles équipant les smartphones mais le progrès technologique joue en notre faveur. Après les batteries à base de lithium (lithium-ion, lithium-polymère), les recherches actuelles portent sur les batteries lithium-oxygène, qui pourraient créer une rupture technologique, ainsi que sur la vitesse de chargement⁷. En fait, le manque d'autonomie n'est pas réellement un obstacle car de nos jours les possesseurs de smartphone ont pris l'habitude de recharger leur batterie

⁷ Deux chercheurs du MIT ont publié un article dans la revue Nature (mars 2009), Gerbrand Ceder et Byoungwoo Kang. Ils affirment que leur découverte permettrait enfin à une voiture électrique d'être rechargée très rapidement tout en conservant une grande capacité.

Il y a deux types de batteries. Dans les batteries standards, le matériau des électrodes sert à emmagasiner beaucoup d'énergie et assez rapidement, mais il la libère très lentement. À l'inverse, un supercapaciteur emmagasine l'énergie seulement à la surface des électrodes. La batterie est donc rapide à charger et à libérer l'énergie mais elle ne peut en contenir une grande capacité. La batterie au lithium est déjà répandue dans les petits appareils électroniques. Depuis longtemps, les recherches ont donc porté sur un type de batterie qui pourrait à la fois se charger et se décharger rapidement tout en accumulant beaucoup d'énergie. C'est ce mystère qu'affirment avoir percé le Pr Ceder et son étudiant M. Kang.

Ces chercheurs auraient en effet réussi à créer des électrodes issues de deux matériaux. Ils auraient ainsi inventé une technique qui utilise du lithium basé sur du phosphate de fer à l'intérieur d'une sphère qui permettrait d'emmagasiner beaucoup d'énergie. L'extérieur de cette sphère serait composé de lithium-phosphate, un très bon conducteur qui agirait ainsi comme un supercapaciteur.

Cette technique pourrait révolutionner l'avenir de la voiture électrique, des téléphones et ordinateurs portables. Une batterie de voiture pourrait ainsi se recharger en quelques minutes, voir quelques secondes.

Comme il ne s'agit pas d'une technologie complètement neuve, mais d'une innovation dans le sens où une ancienne technologie est exploitée d'une nouvelle manière, on pourrait voir cette batterie innovante sur le marché d'ici 2 ou 3 ans, en particulier dans des petits appareils comme les téléphones cellulaires ou les systèmes à base de GPS.

Pour en savoir plus : <http://web.mit.edu/newsoffice/2009/battery-material-0311.html>

une fois voire deux fois par jour. Il faut aussi tenir compte d'initiatives privées (voir par exemple bornes Gidophone, Powertel) de déploiement de bornes de rechargement de batterie dans les lieux publics (aéroports, gares, hôtels, etc).

Le développement d'une « appli » pose la question du choix de l'OS (« operating system », système d'exploitation). Aujourd'hui, le marché de la téléphonie mobile est partagé par 4 grands acteurs, au travers de leurs OS : iOS (d'Apple) qui équipe les iPhone-iPad, Android (de Google), Windows Phone 8 (de l'alliance Microsoft-Nokia), BlackBerry OS (de RIM). C'est Android qui est aujourd'hui majoritaire car il est open source et a su fédérer plus d'une trentaine de constructeurs. C'est un système d'exploitation "ouvert", contrairement à ses deux concurrents principaux que sont Microsoft allié à Nokia et Apple. C'est un point très important car cela signifie que la communauté de développeurs qui contribue à son développement est naturellement plus disposée à investir sur un système ouvert que sur un système rigide et soumis à des cahiers des charges trop contraignants. De plus, les applications Google sont totalement intégrées dans le système d'exploitation, au point de faciliter grandement leur utilisation au quotidien. Néanmoins, le développement d'une appli Android nécessite de tenir compte de la multitude de smartphones existants et donc de la compatibilité de l'interface utilisateur avec tous ces smartphones, ce qui revient à concevoir une interface la plus épurée possible sans toutefois perdre les fonctionnalités requises pour satisfaire au cahier des charges de l'EGT par GPS.

De toutes façons, on ne pourra pas concevoir un plan de sondages avec des enquêtés tous équipés de smartphones. Il y aurait un biais de sélection. Il faut donc prévoir un sous-échantillon d'individus (peut-être 10%) équipés de traceurs GPS dédiés qu'il faudra faire fabriquer spécifiquement.

4. Expérimentation

4.1. Rappel de la structure de l'EGT

Les résultats de l'EGT sont structurés en quatre fichiers :

- le fichier ménages
- le fichier individus
- le fichier déplacements
- le fichier moyens

Le carroyage de l'EGT 2001-2002 est un maillage carré de la région de 300 mètres de côté (le carroyage de l'EGT 2009-2011 est plus fin, 100 mètres de côté). Chaque maille est identifiée par un numéro à 6 chiffres (+ 1 lettre supplémentaire dans l'EGT actuelle).

Par exemple, supposons un ménage constitué de 4 individus (les parents et deux enfants). Seuls les individus de 6 ans ou plus sont enquêtés. Un individu a effectué la veille de l'enquête n déplacements dans la journée. Chaque déplacement est composé d'une suite de différents moyens de transport (aussi appelés trajets). Chaque déplacement est défini par des **variables primaires** (ou fondamentales) :

- son carroyage de départ et son carroyage d'arrivée,
- le motif à l'origine et le motif à la destination,
- l'heure de départ et l'heure d'arrivée,
- les différents moyens (c'est-à-dire les modes de transport successifs utilisés). Par exemple : VP + RER + métro,
- les carroyages d'entrée et de sortie de chaque moyen.

Il y a ensuite un certain nombre de **variables secondaires** pour chaque déplacement :

- attributs spatiaux pour donner une idée des itinéraires : traversée ou non des cordons (A86, périphérique, boulevards des maréchaux), traversée de Paris,
- attributs sur l'accompagnement/dépose, sur la captivité du mode, sur le transport d'objets lourds ou d'animaux,
- attribut sur la survenue d'événements exceptionnels le jour du déplacement (grève, panne, météo, etc),
- attributs sur le coût du déplacement : remboursement de ticket, indemnité, type de stationnement, etc
- attribut sur l'information de tournée,

- attributs des types de destination (sous-motifs) pour les motifs travail, affaires professionnelles et achats (variables DITRA et DLACHA).

Il y a enfin des variables dites "calculées" et des variables dites "regroupées". Une **variable calculée** est une variable nouvelle calculée à partir de variables fondamentales. Par exemple, l'attribut durée est calculé à partir des attributs heure de départ et heure d'arrivée, l'attribut distance est calculé à partir des carroyages d'origine et de destination (c'est donc une distance euclidienne à vol d'oiseau). Une **variable regroupée** est une variable nouvelle qui est définie en fonction des variables. Par exemple, le mode regroupé est le mode principal utilisé lorsque plusieurs moyens ont été pris au cours d'un même déplacement, en tenant compte d'une hiérarchie prédéfinie des modes. Par exemple, dans le cas d'un déplacement "VP+RER+métro", le mode regroupé est "TC".

En 2001-2002, il y avait près de 25 modes et 20 motifs dans la nomenclature des variables fondamentales. En 2009-2010, ce sont près de 41 modes et 38 motifs. Cette inflation de modalités dure depuis 30 ans et complexifie toujours plus le questionnaire.

Dans l'EGT 2001-2002, le fichier déplacements comportait 91 variables (hors variables clés du déplacement), dont 36 variables fondamentales. Le fichier moyens comportait 15 variables (hors variables clés du moyen), dont 3 variables fondamentales.

La collecte de données exclusivement par GPS concerne les variables primaires des fichiers déplacements et moyens. Les variables secondaires pourraient être recueillies de manière automatique pour les variables touchant aux itinéraires (le carroyage devient inutile) et par un dispositif spécifique pour les variables de conditions de déplacements, par exemple un observatoire qui recenserait les informations chaque jour concernant la météo, les grèves, les interruptions de service dans les transports en commun, les fermetures d'autoroutes, ... Nous avons mis en place cet observatoire au cours de l'expérimentation.

4.2. Méthodologie

Il est évident que l'enquête par GPS ne peut pas faire l'économie d'une enquête classique des caractéristiques du ménage et de l'individu. Mais ce sont les parties les plus simples du questionnaire papier EGT. On peut donc envisager pour ces parties, soit une enquête

téléphonique (donc plus simple à administrer qu'une enquête à domicile), soit un questionnaire auto-administré comme pour le recensement général de la population.

Un **questionnaire papier individu simple** a été adressé aux vingt-trois expérimentateurs avant le début de l'enquête (annexe 1) :

- Age, situation familiale, nombre d'enfants et âge, motorisation, profession. Le nom-prénom est facultatif.
- Adresses du lieu de domicile, de travail, d'école, des deux lieux d'achats les plus fréquentés, du lieu habituel du déjeuner, du lieu de visite ou d'accompagnement le plus fréquent.

L'enquête par GPS et l'enquête papier ont été menées **en parallèle** mais par deux équipes **différentes**. Deux équipes ont donc été constituées : "l'équipe GPS" et "l'équipe Papier". A aucun moment, l'équipe GPS n'a eu connaissance des données de la collecte par l'équipe Papier (et inversement).

Chaque individu est enquêté pendant **une semaine**, du lundi au dimanche. Il doit porter sur lui le traceur **en permanence** depuis l'instant où il quitte le domicile le matin jusqu'à l'instant où il rentre le soir. L'équipe Papier doit remplir le questionnaire papier en fin de journée sur les déplacements du jour ou le lendemain sur les déplacements de la veille.

C'est le traceur **Qstarz BT-Q100X** qui a été retenu. Il a une capacité d'enregistrement largement suffisante pour nos besoins (200 000 points) mais une autonomie de batterie de seulement 42 heures selon le fabricant. En effet, en choisissant de paramétrer le traceur sur un point toutes les cinq secondes et en supposant une durée de fonctionnement de 15 heures par jour, on arrive à 75600 points sur 7 jours. En revanche, il est demandé à l'enquêté de **recharger la batterie** deux fois dans la semaine avec le câble USB fourni (mercredi et vendredi). Pour certains expérimentateurs peu enclins aux nouvelles technologies, on a confié trois traceurs, chacun étant utilisé 2 jours et demi, ce qui leur a évité la tâche du téléchargement intermédiaire.

Remarques :

- Le protocole aurait été différent si l'on avait choisi une fréquence d'enregistrement d'un point par seconde. Il faudra aussi tenir compte du fait que si l'on veut calculer des accélérations (et non plus des vitesses) pour recouper avec les caractéristiques cinématiques d'un mode, on aura besoin d'enregistrer un point par seconde ou toutes les deux secondes.

- Un protocole spécifique a été assigné au seul expérimentateur porteur de l'iPhone à cause de la batterie qui est consommée entièrement en 4 heures. Il a été suivi sur deux demi-journées en Province et sur un seul déplacement en Île-de-France.
- L'obligation de rechargement de la batterie par l'enquêté au cours de la semaine peut constituer un frein à l'adoption du GPS mais en fait, il faut se projeter à long terme et ne pas oublier que les progrès incessants de la technologie jouent en notre faveur.

Nous disposions de 15 traceurs Qstarz. Ils ont été mis en rotation pendant l'expérimentation. L'organisation logistique mise en place a bien fonctionné. Il y a eu entre deux et quatre individus enquêtés par semaine. L'enquête s'est déroulée entre février et avril 2010, en évitant les semaines de vacances.

L'équipe Papier a été chargée de construire la base de données des déplacements et des trajets sur un tableur. A priori, on a estimé le nombre de déplacements collectés entre 600 et 650 déplacements (22 volontaires*7 jours*4 déplacements par jour), soit, et pour chacun des déplacements, 39 variables fondamentales à saisir (dont 3 pour chaque moyen). La tâche la plus pénible a consisté pour l'équipe Papier à **repérer les carroyages** d'entrée et de sortie de chaque moyen sur le SIGR à partir de la couche du carroyage prêtée par le STIF.

L'équipe GPS a été chargée de construire cette même base de données exclusivement à partir des enregistrements de points GPS, des diverses couches de données du SIGR, des informations du questionnaire papier individu et de son expertise humaine de la mobilité, des modes et des réseaux routier et de transport en commun. **Aucun logiciel système expert n'a été utilisé.**

4.3. Protocole

La comparaison des 4 traceurs (IGOTU, BT-Q1000X, TrackStick MINI et Route 66) de novembre à décembre 2009 a abouti au choix du traceur Qstarz BT-Q1000X. Il est le plus performant sur les critères de temps de démarrage et de précision géographique. Il est fourni avec un logiciel de visualisation des enregistrements interfacé avec Google Earth. Il présente cependant un défaut déjà évoqué pour nos besoins : une batterie relativement faible.

Les 23 expérimentateurs (dont 1 sur iPhone) ont été recrutés au sein des organismes des membres du Comité de suivi. Un référent par organisme a été désigné. La répartition est la suivante :

- IAU îdF : 14 (+ 1 iPhone), dont 3 salariés de l'IAU, les autres étant des membres de la famille des collègues de l'IAU îdF,
- STIF : 2
- DRIEA : 2
- IFSTTAR : 1 + un membre de sa famille
- Ministère/DRI : 1
- Cofiroute : 1

Un protocole précis (annexe 3) a été défini pour l'expérimentation et expliqué à chaque expérimentateur volontaire. Il préfigure le protocole réel qui serait mis en place dans le cas d'une enquête grandeur nature. Le principe de base est de demander le **minimum d'effort à l'expérimentateur**. L'organisation logistique d'une telle enquête a été testée. Le protocole est résumé ci-après.

On confie au volontaire 1 traceur et 1 autre en cas de secours. Le traceur devra être rechargé tous les 2 jours avec le câble USB fourni. Ceci est dû à l'autonomie de la batterie qui est d'environ 40 heures. Un traceur est allumé en moyenne 15 heures par jour. Il faut éteindre le traceur la nuit. L'enquête se déroule donc du lundi au dimanche.

Pour quelques volontaires (personnes n'ayant pas la possibilité ou le temps de recharger la batterie pendant 3 heures), on confie 3 traceurs. Les deux premiers traceurs seront portés 2 jours, le troisième porté 3 jours. On ne souhaite pas transférer à l'expérimentateur la responsabilité de recharger la batterie et de télécharger les enregistrements.

Le matin, il est demandé à l'expérimentateur d'allumer le traceur (position "log") dès le lever afin que l'opération de géolocalisation ne retarde pas son départ. Puis il devra le poser près d'une fenêtre pour permettre le repérage par le GPS. C'est-à-dire que le traceur est allumé bien avant de partir, le temps de prendre son petit-déjeuner et de se préparer à sortir. Normalement, au bout de 2-3 minutes au plus (parfois en moins d'une minute), le traceur est localisé et commence à clignoter en orange. Puis l'expérimentateur ne devra pas oublier de le prendre avant de quitter le domicile. Le traceur est porté au cou (l'orientation importe peu, il y a une antenne 360 °). Chaque traceur est équipé d'une dragonne. Deux expérimentateurs faisaient partie de la même famille. Les dragonnes étaient de couleur différente. Il était expressément demandé aux participants de ne pas mettre le traceur dans

la poche ou dans le sac. Certains n'ont pas respecté cette consigne et ce sont chez eux que les quelques pertes de signal se sont produites.

Le traceur est donc porté **autour du cou** jusqu'à la fin de la journée, sous le vêtement (pull, chemise, etc). Idéalement, lorsque l'expérimentateur se trouve en intérieur (au bureau, à la maison, ...) pour une longue durée, il faudrait le retirer du cou et le poser près d'une fenêtre mais il y a un risque de l'oublier lorsqu'on veut ressortir et effectuer un déplacement à l'extérieur donc il est demandé à l'expérimentateur de le garder au cou en permanence et de ne plus y penser, en prenant le risque que le temps de démarrage à chaud soit supérieur au temps de rabattement vers une station de métro. Le traceur n'est retiré du cou que le soir au retour du dernier déplacement puis éteint (position "off").

Un système automatisé d'envoi de **SMS** a été mis en place : le premier SMS à 7h tous les matins (8h le samedi et 8h30 le dimanche) pour rappeler qu'il faut allumer le traceur et un autre les mardi, jeudi et samedi à 14h pour rappeler qu'il faut recharger la batterie. Pour ceux qui ont 3 traceurs, des SMS sont envoyés le mercredi et le vendredi pour rappeler qu'il faut changer de traceur.

L'enquête papier a été menée en parallèle. Le questionnaire EGT 2009-2010 est retenu. Il est constitué de deux questionnaires : déplacements et trajets.

Chaque jour, le référent de l'organisme interroge l'expérimentateur sur ses déplacements de la veille. Cette enquête a lieu en face-à-face à n'importe quel moment de la journée (on n'oblige pas à le faire en fin d'après-midi). L'information de carroyages des entrées-sorties des trajets est recueillie au cours de l'entretien en s'aidant du carroyage de 100 mètres fourni par le STIF.

Si le référent ou l'enquêté est absent, il faut remplir le questionnaire le lendemain et le préciser.

Pour un expérimentateur qui est dans un organisme sans référent (cas de Cofiroute et du Ministère), c'est l'équipe Papier de l'IAU qui remplit le questionnaire chaque jour par téléphone. L'information des carroyages n'est pas recueillie par téléphone. C'est l'adresse postale qui est demandée.

Pour les déplacements de vendredi, samedi et éventuellement le dimanche, le référent ou l'équipe Papier interroge le volontaire lundi sur les trois jours.

A la fin de l'enquête (le lundi soir ou mardi suivant la semaine d'enquête), les traceurs et questionnaires sont déposés dans deux enveloppes différentes (préalablement timbrées par l'équipe GPS de l'IAU) et mis au courrier départ ou récupérés directement par un coursier envoyé par l'IAU.

Une réunion d'information a été organisée en janvier 2010 pour l'équipe GPS et l'équipe Papier.

4.4. Agenda et mise en place d'un observatoire

Les informations sur le déroulement de l'expérimentation qui a eu lieu sur 7 semaines de février à avril 2010 (hors période de vacances) ont été collectées dans un agenda sur le site internet du projet, faisant office d'observatoire :

- informations non anonymes sur les 22 expérimentateurs enquêtés (+ 1 sur iPhone) et leur semaine de suivi. Chacun a un numéro.
- événements particuliers jour par jour (grève, neige, suicide, etc).
- divers.

Les informations données ci-dessous ne sont pas exhaustives. Elles illustrent seulement la possibilité de tenir à jour un agenda sur les conditions de déplacement sur l'ensemble des réseaux d'Île-de-France et ainsi d'éviter à tous les enquêtés ces mêmes questions qui se trouvent dans le questionnaire papier (exemple : était-ce un jour de grève ?). Pourquoi poser la question 200 fois par jour (si 200 individus enquêtés par jour pendant 10 mois) alors que la réponse est la même (pas de grève) ? L'existence de la rubrique « Actualités trafic » du site vianavigo.fr montre qu'il est possible de construire une base de données des perturbations du trafic dans les transports en commun.

Semaine 1 : lundi 8/02 au dimanche 14/02 (3 volontaires)

- mercredi, jeudi et vendredi : neige
- samedi 13 : gros problèmes sur les RER B (30 min de retard) et D (50 min de retard) entre 18h et 21h

Semaine 2 : lundi 15/02 au dimanche 21/02 (4 volontaires)

- lundi : "Grave accident de voyageur" sur la ligne 4 (il paraît qu'on a dû soulever une rame pour désincarcérer ...). Arrêt ligne de 9h15 à 10h45

- mardi : "Grave accident de voyageur" sur la ligne B. Arrêt entre Mitry-Claye et Aulnay-sous-Bois entre 7h30 et 9h.
- samedi : grands départs en vacances de février
- dimanche : "Grave accident de voyageur" sur la ligne Paris Est-Esbly. Arrêt entre 16h et 18h.

Semaine 3 : lundi 8/03 au dimanche 14/03 (2 volontaires) et mercredi 10/03 au mardi 16/03 (1 volontaire)

- début de semaine glacial (-3°C le matin)
- lundi : "Grave accident de voyageur" sur la ligne RER D entre Melun et Villeneuve-Saint-Georges. Arrêt entre 15h et 16h30.
- jeudi : grève sur la ligne RER B au sud
- samedi : opération escargot des motos sur le périphérique
- dimanche : grève sur la ligne Saint-Lazare et perturbations sur la ligne A

Semaine 4 : vendredi 12/03 au jeudi 18/03 (2 volontaires) et lundi 15/03 au dimanche 21/03 (1 volontaire), et mardi 16/03 au dimanche 21/03 (1 volontaire)

Semaine 5 : lundi 22/03 au dimanche 28/03 (3 volontaires)

- lundi : "Grave accident de voyageur" sur la ligne RER B entre Laplace et Bourg-la-Reine. Arrêt entre 17h et 19h.

Semaine 6 : lundi 29/03 au dimanche 4/04 (1 volontaire)

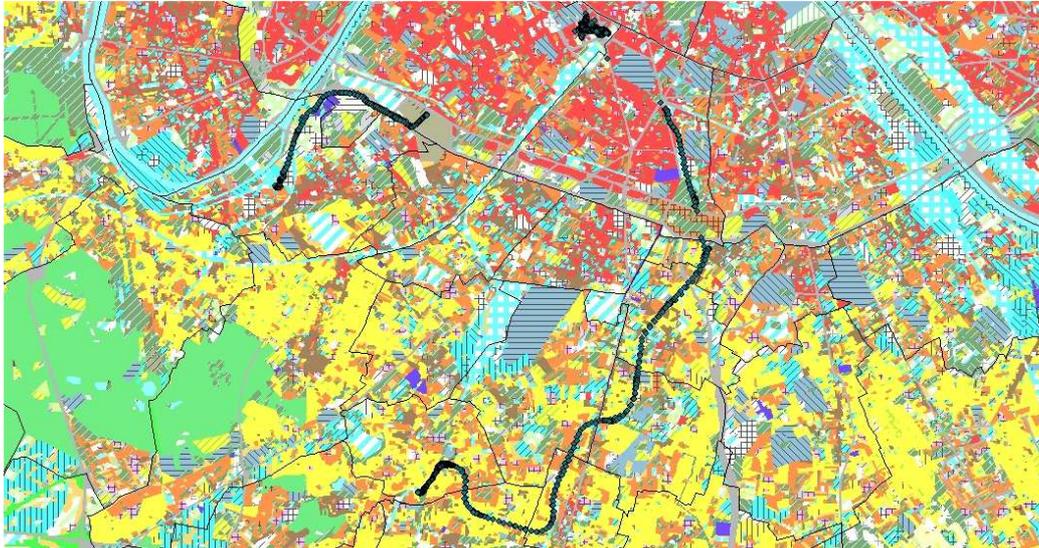
- à partir de lundi 22 h : fermeture de A6b entre Porte d'Italie et Arcueil (sens P-Provence) pendant 10 mois.
- vendredi : "Grave accident de voyageur" sur la ligne RER A à Gare de Lyon. Arrêt entre 6h et 9h (?)

Semaine 7 : lundi 12/04 au dimanche 17/04 (4 volontaires)

- perturbations sur la ligne B à cause de grèves toute la semaine
- mercredi : ligne T2 arrêtée entre 18h et 19h

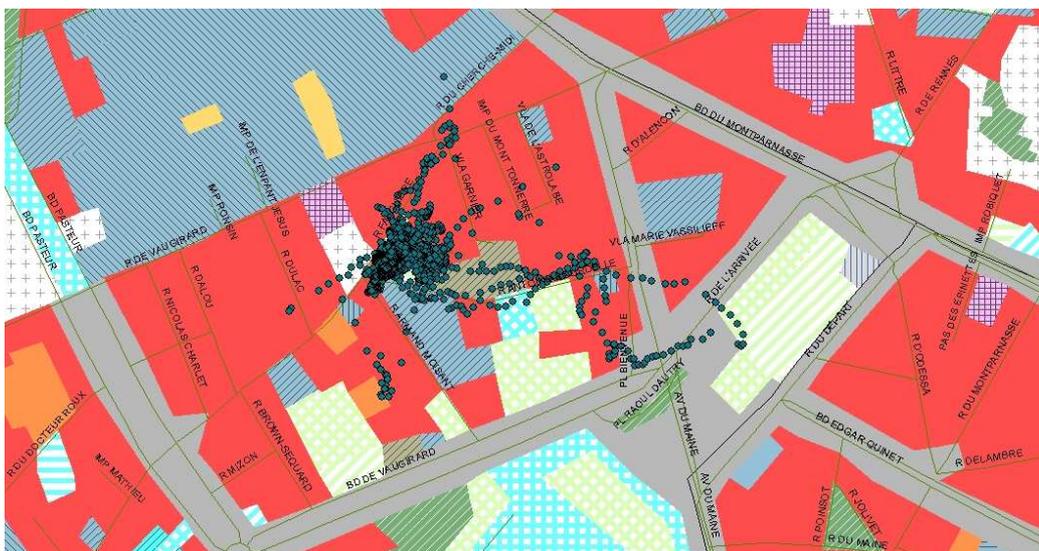
4.5. Exemples d'enregistrements GPS

Une procédure informatique d'importation des données GPS issues du traceur QStarz dans le SIGR a été développée (annexe 4).



Carte 2 : déplacements du volontaire n°6 au cours d'une journée. Fond : MOS

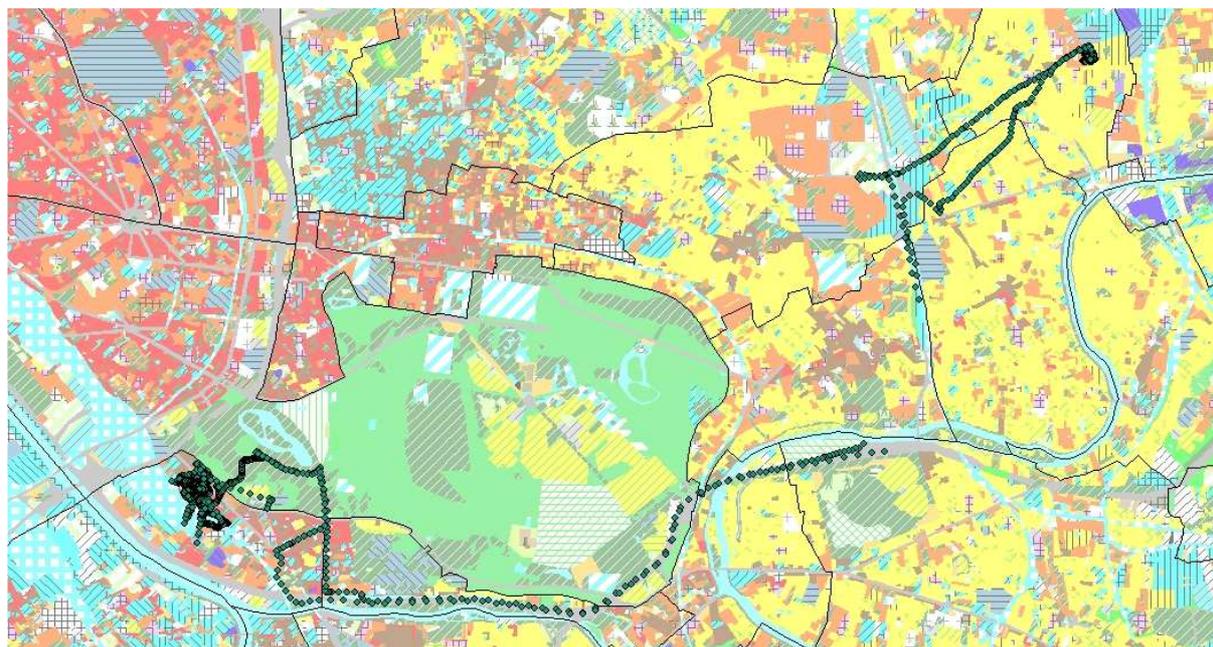
Sur la carte 2, on reconnaît les sillons du RER B, une coupure dans Paris due à un trajet en métro, les sillons du prolongement du T3 de la Porte de Versailles à Issy-les-Moulineaux. Les heures de départ et d'arrivée sont repérées à la minute près. Chaque déplacement a été analysé point par point, y compris la vitesse instantanée et l'heure.



Carte 3 : Zoom de la carte précédente sur le nuage de point près de la Tour Montparnasse

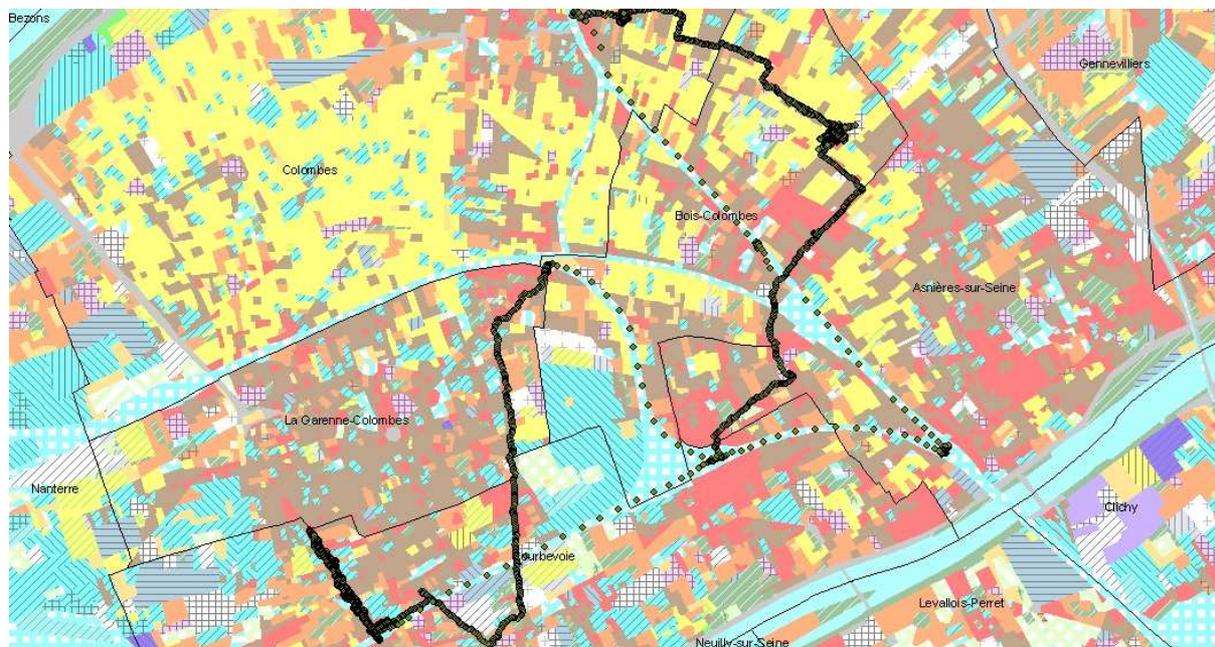
Le nuage de points est centré sur le lieu de travail déclaré dans le questionnaire simplifié. On reconnaît des déplacements à pied vers la Tour Montparnasse et vers la station de métro

Falguière, mais il y a trop de points parasites qui ralentissent le processus d'identification des déplacements et trajets à pied courts.



Carte 4 : déplacements du volontaire n°16 au cours d'une journée. Fond : MOS

On reconnaît des itinéraires passant par A86 et A4. En analysant dans le détail les attributs des points, on a retrouvé correctement des motifs achats et même un motif accompagnement à la gare de Villiers-sur-Marne.



Carte 5 : déplacements du volontaire n°10 au cours d'une journée. Fond : MOS

On reconnaît des déplacements en train (points espacés sur les sillons du réseau Saint-Lazare) et des déplacements à pied (points peu espacés).

5. Résultats

La Base déplacements GPS a été constituée en croisant :

- la reconnaissance visuelle,
- les données du questionnaire simplifié
- et le MOS du SIGR.

Il est important de souligner encore une fois qu'aucun logiciel système-expert n'a été utilisé car il n'y avait rien de disponible à ce moment. L'identification des déplacements et la détection des modes-motifs a été faite visuellement par un **technicien⁸ bien formé**. Rappelons que l'objectif de cette phase 1 de la recherche n'est pas de mettre au point un logiciel système-expert mais de montrer la faisabilité d'une enquête par GPS sans enquêteur en comparaison avec une enquête traditionnelle, sur un échantillon quelconque de déplacements, non représentatif, mais suffisamment de taille (environ 600 déplacements).

Par exemple, le mode est rapidement identifié dans la plupart des cas par l'itinéraire sur le fond de plan MOS. S'il y a ambiguïté ou doute, par exemple entre deux modes de surface de type bus et VP, le technicien demande l'avis à un spécialiste, et ensemble ils analysent plus précisément les points d'arrêt, les temps d'arrêt et le réseau de bus complet disponible dans le SIG. La Base papier, y compris les variables de carroyage, a été saisie de manière classique.

La **base finale fusionnée** comporte 635 déplacements pour la partie papier et 509 déplacements pour la partie GPS (extrait en annexe 2). Elle est construite de manière à ce que sur chaque ligne, on puisse comparer les variables du déplacement observé par GPS et celles du déplacement déclaré. Nous présentons maintenant les résultats de la comparaison.

5.1. Variable mode regroupé

	GPS	Papier
TC	199	209
VP	90	92
Vélo	9	9
MAP	205	325
perte signal GPS	6	0
Nb déplacements	509	635

Tableau 3 : Effectif par mode regroupé

⁸ Maxime Raingal, stagiaire en Master 2 CIMO de l'ENPC/IUP, et Caroline Raes, stagiaire en Master 2 à Sciences Po.

La partie enquête papier de notre expérimentation était un peu biaisée car les volontaires ont été très sérieux et compliants dans la déclaration de leurs déplacements. Le taux de mobilité journalier de l'enquête papier est de 4,1 contre 3,3 dans l'enquête par GPS alors qu'il devrait être de 3,5 à 3,7 en moyenne (EGT 2001 et 2010). Donc le GPS *actuel* fait perdre des déplacements (en l'occurrence les déplacements courts en MAP), et on ne retrouve pas le constat de Ashley et al (2010) qui suggèrent à partir des enquêtes mobilité à Londres, Sydney, Melbourne, Brisbane, un recensement minoré de 7 à 20% des déplacements dans les Enquêtes mobilité classiques (déplacements non déclarés, touristes et commerciaux itinérants non enquêtés). On peut penser qu'un GPS « amélioré » pourrait permettre non seulement de retrouver les déplacements non déclarés mais ce qui serait nouveau, de suivre les non enquêtés de l'EGT papier (touristes et itinérants).

5.2. Variable chaîne modale

Nous avons reconstitué la chaîne modale pour chaque déplacement, c'est-à-dire la suite des modes (ou trajets) utilisés.

Mode	GPS	Papier	Mode	GPS	Papier
Bus	12	10	Métro + VP	1	
Bus + Métro	2	5	Noctilien	1	1
Bus + Métro + Grandes lignes	1	1	Perte de signal	4	
Bus + Métro + RER + Bus	1		RER	17	19
Bus + Métro + Train ban	1	1	RER + Bus	3	5
Bus + RER	4	4	RER + Métro	14	12
Bus + RER + Métro	1	1	RER + Train ban	2	1
Bus + RER + TGV	1	1	RER + VP Passager	2	1
Bus + RER + Train ban		2	TGV + VP	1	1
Bus + TVM	1	1	Train ban	6	7
Bus + VP passager		2	Train ban + Métro	3	3
Covoiturage		2	Train ban + VP	1	1
MAP	205	325	Tram	1	1
Métro	91	93	Tram + Métro	1	1
Métro + Bus	3	2	TVM	1	1
Métro + Grandes lignes + TER + Taxi		1	Vélo	9	9
Métro + RER	13	14	VP	64	55
Métro + RER + Bus	3	3	VP + RER + Métro	1	1
Métro + RER + VP	1	1	VP + TGV	1	1
Métro + TGV	1	1	VP + Train ban	1	1
Métro + Train ban	3	2	VP Passager	26	37
Métro + Train ban + Noctilien		1	VP passager + TVM	1	1
Métro + Train ban + VP passager		1	VP passager + TVM + Métro	1	1
Métro + Tram	1	1	Total général	509	635

Tableau 4 : Effectif par chaîne modale

Le tableau 4 montre que les grandes différences entre les deux méthodologies portent sur les modes VP, VP passager et MAP. Un déplacement en voiture est identifié sans ambiguïté

dans la méthodologie GPS-SIG comme « VP Passager » dans les cas suivants : l'expérimentateur n'a pas de permis de conduire, il n'a pas de voiture, le trajet de rabattement est différent de celui du matin (par exemple bus le matin et VP Passager le soir). Dans les autres cas, le recueil par GPS ne permet pas de savoir si l'enquêté est conducteur ou passager dans une voiture. Cette ambiguïté pourrait être partiellement levée dans le cas où l'accompagnement est effectué par un membre du ménage et si tous les individus du ménage sont enquêtés. Sinon, il n'y a pas d'autres solutions que de poser systématiquement la question lors d'une enquête téléphonique de suivi légère.

Le mode métro est quasiment identifié à 100%. La coupure de signal à proximité d'une entrée de métro puis sa réactivation à la sortie d'une autre station sont évidemment les premiers critères de reconnaissance. La coupure de signal est donc paradoxalement un moyen de détecter le mode métro. L'inconvénient est la lacune sur l'itinéraire emprunté mais rappelons que jusqu'à l'EGT 2001-2002 compris, il n'y avait aucune information dans le questionnaire papier sur les numéros de ligne de métro (cette information est nouvelle dans l'EGT 2010). On peut très bien envisager de compléter le système-expert par un calculateur d'itinéraire en transport en commun pour retrouver les lignes empruntées et en croisant avec la durée du trajet.

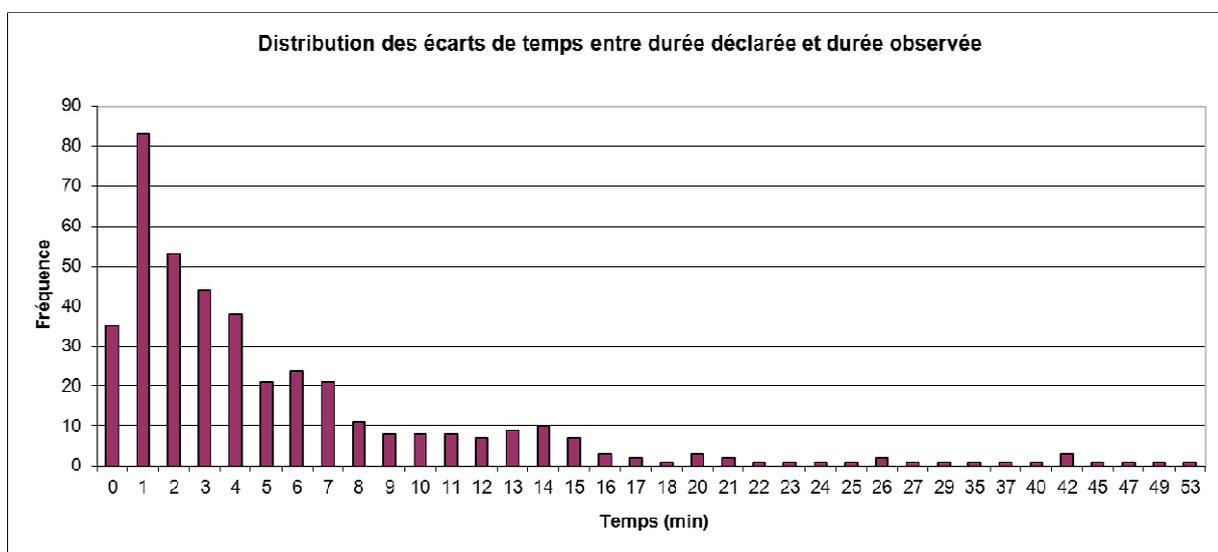
En regardant dans le détail, on a constaté que sur les déplacements en MAP, la différence de 120 déplacements (325-205, tableau 4) entre les deux méthodologies est une différence nette. En effet, il y a 28 déplacements courts en MAP qui n'ont pas été déclarés mais qui ont été retrouvés par le GPS, et inversement 92 déplacements déclarés mais non identifiables par la méthodologie GPS-SIG. Donc pour un certain nombre de déplacements courts à pied, la méthodologie GPS permet effectivement de les retrouver comme cela était pressenti.

5.3. Variable durée

Si on considère que le GPS repère correctement à la minute près les heures de départ et d'arrivée, nous constatons que près de 2/3 des déplacements (graphique 1) sont déclarés dans l'enquête papier avec une incertitude inférieure à 5 minutes. Ce chiffre est peut-être légèrement biaisé car les expérimentateurs sont pour la moitié des professionnels du transport et ont été sensibilisés à l'intérêt de cette recherche. Ils ont donc été très attentifs aux heures de départ et d'arrivée (certains ont même tenu un agenda papier de leurs déplacements, alors que cela ne leur était pas demandé).

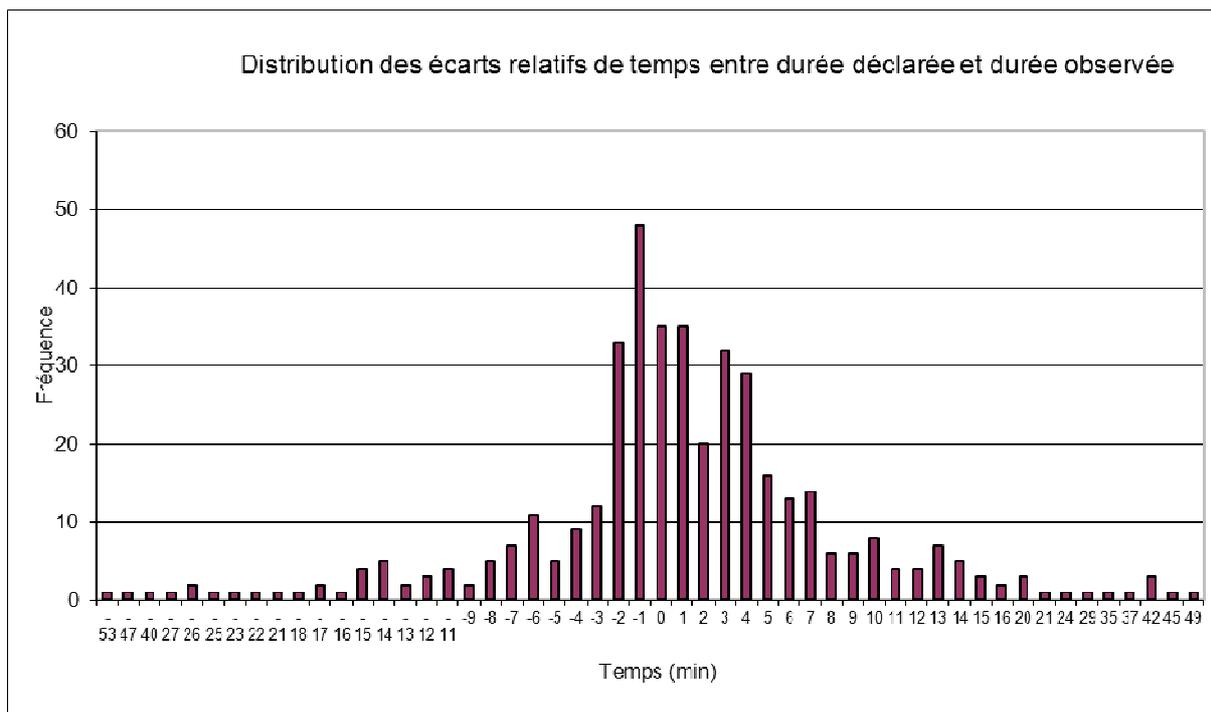
Il y a quand même 16% (tableau 5) des déplacements qui présentent une erreur de plus de 10 minutes en valeur absolue, et 22% (tableau 6) si on ne considère que les déplacements VP et TC, ce qui n'est pas négligeable. Il faut se rappeler que cette variable de durée est discriminante dans les études de modélisation, en particulier dans le calage des modèles de choix modal, et que les imprécisions sur cette donnée de base ont des conséquences lourdes sur les résultats de calage.

Les écarts de durée les plus élevés concernent les modes motorisés et non la marche (tableau 6). Ceci paraît normal car les durées de déplacement par mode motorisé sont plus longues que celles par la MAP.



Graphique 1 : Distribution des écarts de temps entre la durée déclarée et la durée observée par GPS tous modes confondus en valeur absolue

La distribution suivante (graphique 2) des écarts relatifs montre que globalement les durées déclarées sont surestimées par rapport aux durées observées par GPS (l'axe de symétrie est décalé vers la droite par rapport à 0).



Graphique 2 : Distribution des écarts de temps entre la durée déclarée et la durée observée par GPS tous modes confondus en valeur relative

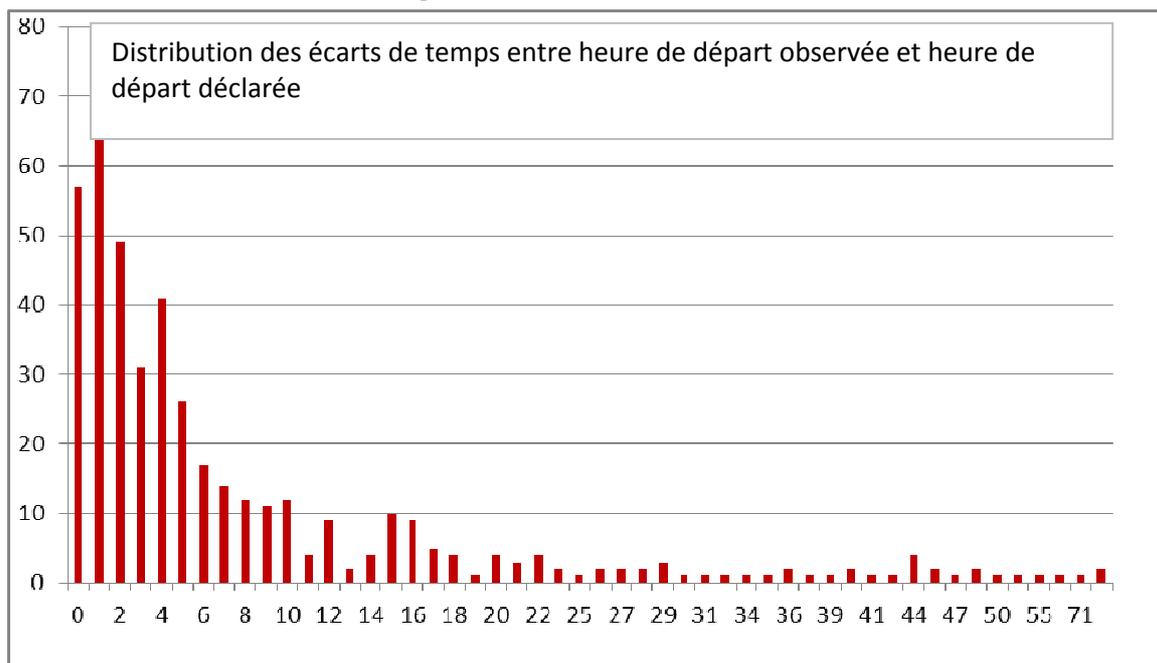
tranche temps (min)	%
0-5	66%
6-10	17%
11-15	10%
16-20	2%
21-25	1%
26-30	1%
>30	2%
	100%

Tableau 5 : Ecart entre les durées calculées par GPS et les durées déclarées en valeur absolue tous modes confondus

tranche temps	TC	VP	2R non motorisés	MAP	Tous modes
0-5	60,1%	55,6%	66,7%	79,4%	65,9%
6-10	19,6%	22,2%	33,3%	10,9%	17,3%
11-15	13,8%	13,6%		4,6%	9,9%
16-20	0,7%	3,7%		2,3%	2,2%
21-25	2,2%	1,2%		0,6%	1,4%
26-30	1,4%			1,1%	1,0%
>30	2,2%	3,7%		1,1%	2,4%
Total	100%	100%	100%	100%	100%

Tableau 6 : Ecart entre les durées calculées par GPS et les durées déclarées en valeur absolue par mode regroupé

5.4. Variable heure de départ



Graphique 3 : Distribution des écarts de temps entre l'heure de départ observée par GPS et l'heure de départ déclarée tous modes confondus en valeur absolue

tranche temps (min)	%
0-5	62%
6-10	15%
11-15	7%
16-20	5%
21-25	2%
26-30	2%
>30	6%
	100%

Tableau 7 : Ecart entre les heures de départ observées par GPS et les heures de départ déclarés tous modes confondus

Rappelons que la durée est une variable calculée à partir des heures de départ et d'arrivée déclarées. On constate que les écarts de plus de 15 minutes sur la variable heure de départ représentent 15% des déplacements. Cette variable est aussi une donnée de base pour connaître en Île-de-France le profil horaire journalier de la demande de déplacements et suivre l'évolution de la « période de pointe » du matin et du soir. Elle sert aussi, avec la variable heure d'arrivée, à calculer dans les modèles de trafic les coefficients de passage de la journée à la période de pointe⁹. Ainsi, une donnée imprécise a des conséquences lourdes d'une part sur les analyses, d'autre part sur les études de modélisation.

⁹ Période de pointe du matin : 7h30-9h29 heure d'arrivée
Période de pointe du soir : 17h-18h59 heure de départ

5.5. Variable motif regroupé

Si on considère que les motifs à l'origine et à la destination déclarés sont corrects, on cherche à savoir quelle est la part des déplacements dont les motifs ont été correctement imputés par la méthodologie GPS.

Dépl. avec identité motifs O et D	259	39%
Dépl. déclarés, non observés par GPS	154	23%
Dépl. observés par GPS, non déclarés	28	4%
Dépl. avec motifs ambigus	148	22%
Dépl. avec motifs identifiés avec erreur	62	9%
Dépl. GPS sans motif car perte de signal	11	2%
Total	662	100%

Tableau 8 : Comparaison des motifs de déplacements par les deux méthodologies

Le taux de reconnaissance des motifs par la méthodologie GPS-SIG est de 39%. On peut y ajouter les 4% de déplacements observés par GPS mais non déclarés, soit en tout 43%. L'incertitude sur les motifs concerne en général l'indétermination entre **trois motifs** : achats quotidiens (de type boulangerie), affaires personnelles (par exemple la Poste, non codé dans le MOS, visite chez le médecin), loisirs (de type visite à des amis).

Il y a tout de même 9% d'erreurs sur les motifs (on considère qu'il y a erreur lorsqu'un des deux motifs origine-destination est faux). Cela peut concerner par exemple un motif destination identifié comme Achat (car le polygone est codé comme Centre commercial) mais en fait, l'enquêté est allé au restaurant (donc déclaré comme motif Affaires perso) situé dans la galerie marchande couverte, ou autre exemple, un déplacement au marché (motif Achat) mais déclaré comme motif Loisirs par l'enquêté. Une erreur sur un motif destination entraîne de fait une erreur sur le motif origine du déplacement suivant, sauf si c'est le dernier déplacement de la journée.

Ces exemples d'incertitude sur les motifs illustrent deux problèmes :

- Un problème intrinsèque à l'EGT depuis 30 ans : la difficulté pour l'enquêté et l'enquêteur à définir précisément les motifs dans certains cas. L'actuelle EGT a pensé pouvoir y remédier en doublant quasiment le nombre de motifs (on est passé de 20 à 38 de 2001 à 2009), mais cela a encore alourdi le questionnaire qui n'en avait peut-être pas besoin.
- Un problème de la méthode d'imputation des motifs par le Mode d'Occupation du Sol numérique : cette méthode associe de manière injective un poste du MOS (83) à un seul motif (7 regroupés : domicile, travail, affaires professionnelles, école, achat,

affaires personnelles, loisirs). Par exemple, un polygone Centre commercial (poste 43) renvoie systématiquement au motif « Achat ». Or en fait cela peut être un déplacement pour motif « Loisirs » (aller au cinéma du Centre commercial régional de Vélizy). Donc il n'y a pas de fonction reliant MOS et motif.

Si on applique cependant une règle de surjection MOS-motif, le tableau 9 montre la répartition des motifs correctement identifiés par GPS-SIG.

D <-> T	80
D <-> Aff. Pro	8
D <-> Achats	35
D <-> Loisirs	20
D <-> Aff. Perso	36
D <-> Ecole	12
Autres que D <-> T	50
Autres que D,T <-> Autres que D,T	18

259

Tableau 9 : Motifs correctement identifiés par GPS

5.6. Variable multimodalité

La nouvelle méthodologie permet d'observer la diversité des modes selon les jours de semaine. De nombreuses études montrent que les individus n'utilisent pas qu'un seul mode tous les jours de la semaine mais choisissent leur mode en fonction de leurs activités. Le résultat de l'analyse des modes par enquêté et par jour (samedi et dimanche exclus) est présenté dans le tableau 10. Le volontaire sur iPhone n'est pas pris en compte dans cette analyse car il n'a été suivi que sur un seul jour.

	Volontaire	VP	TC	VP+TC	Vélo	TC+vélo	MAP	PdT	Total jours semaine
1		3					2		5
2		2	1	1				1	5
3			4				1		5
4		1		1			1	2	5
5			2	2		1			5
6		1	3	1					5
7			4	1					5

8		4				1	5
9		4				1	5
10		3	1			1	5
11	3		2				5
12	3		2				5
13		4				1	5
14		5					5
15		2				1	2
16	4						1
17	2	1				2	
18		4	1				
19		5					
20	3	1					1
21	2						3
22	1	3	1				

Tableau 10 : Multimodalité des 22 enquêtés de lundi à vendredi

(*) PdT : pas de transport ou pas de signal

Il n'y a que 2 enquêtés sur 22 qui sont monomodaux. Même si la loi des grands nombres permet de prendre en compte dans une certaine mesure (par segment de population) la diversité des modes sur une semaine dans l'EGT classique, il apparaît que la multimodalité est un phénomène très répandu et qu'il est nécessaire de mieux l'observer à un niveau désagrégé.

5.7. Variable distance

Dans l'EGT classique, la distance est une distance euclidienne calculée à partir du carroyage. Nous avons calculé pour une cinquantaine de déplacements (10% de la base GPS) la distance réseau à partir des points origine et destination avec le module Network Analyst disponible dans le SIGR et la distance euclidienne correspondante à partir des carroyages origine et destination. Lorsque le graphe d'un réseau (VP ou TC) présentait des coupures topologiques, on est passé par un logiciel de calcul de plus court chemin sur internet en saisissant les adresses postales de départ et d'arrivée.

La distance euclidienne sous-estime la distance réelle sur les réseaux, en moyenne de 31%. Ce ratio, qu'on peut appeler coefficient de détour, est très variable selon la distance, comme le montre le tableau 11. Il y a donc un gain de précision très important apporté par l'EGT par GPS qui collecte les données à l'adresse postale ainsi que les itinéraires. La difficulté du post-traitement réside dans le calcul de la distance sur les réseaux qui est beaucoup plus compliqué que le calcul d'une distance euclidienne. Il est nécessaire de disposer d'un calcul de longueur d'itinéraires connus et non du plus court chemin. Or un logiciel de calcul de plus court chemin ne va pas nécessairement retrouver l'itinéraire choisi par l'individu. L'idéal est d'utiliser le module Network Analyst, ce que nous avons fait pour les déplacements qui ne présentaient pas de coupure sur le graphe.

Commune origine	Commune destination	Mode	Distance EGT par GPS	Distance EGT papier	Ecart relatif
92032	75115	RER + Métro	11 384	6 957	64%
75115	75115	MAP	489	412	19%
75115	92130	Métro + Tram	6 025	4 960	21%
75115	92032	Métro + RER	11 556	7 001	65%
92032	75115	RER + Métro	11 201	6 957	61%
75115	75115	MAP	491	412	19%
75115	75115	MAP	432	361	20%
75115	75115	MAP	441	424	4%
75115	75115	MAP	645	447	44%
75115	92032	Métro + RER	11 442	6 957	64%
92032	75115	RER + Métro	11 369	6 957	63%
75115	75107	Métro	1 820	825	121%
75107	75115	Bus	1 193	906	32%
75115	92032	Métro + RER	11 405	6 957	64%
92032	92071	MAP	1 059	608	74%
92032	92071	MAP	996	1 789	-44%
92071	92060	VP Passager	1 357	1 789	-24%
92060	92032	VP Passager	601	450	34%
92032	92032	MAP	1 715	762	125%
92032	92032	MAP	964	762	27%
92032	92071	VP Passager	1 653	608	172%
92071	92032	VP	1 646	608	171%
92032	92071	MAP	1 238	671	85%
92071	92032	MAP	1 020	671	52%
92032	75112	VP + RER + Métro	12 641	9 745	30%
92032	92071	MAP	1 106	671	65%
92071	92032	MAP	950	671	42%
92032	92032	VP Passager	856	539	59%
92032	92032	VP Passager	1 042	539	93%
92032	92032	MAP	744	224	233%
92032	92032	MAP	754	224	237%
92032	93066	RER	20 332	15 843	28%
93066	93066	MAP	1 064	300	255%
93066	92032	RER	21 226	16 508	29%
92032	92032	MAP	777	224	247%
92032	92032	MAP	802	224	259%
78481	75112	RER	21 920	19 797	11%
75112	75112	Métro	2 695	1 487	81%
75112	75112	Bus	3 377	1 487	127%
75112	75113	Métro	3 952	2 518	57%
75113	75112	Métro	2 750	2 518	9%
75112	78481	RER	20 102	19 639	2%
75112	75113	Métro	2 337	1 746	34%
75113	75112	Métro	2 274	1 746	30%
75112	78481	RER	20 280	19 639	3%
75112	78481	RER + VP Passager	20 240	19 765	2%
95176	78418	VP Passager	7 699	5 112	51%
78418	78481	VP Passager	4 799	3 499	37%
			266 861	203 912	31%
			ratio	1,31	

Tableau 11 : comparaison distance réseau versus distance euclidienne
sur une cinquantaine de déplacements

5.8. Synthèse des résultats

L'expérimentation a permis de mettre en lumière les avantages et les problèmes de l'enquête intégrale par GPS par rapport à l'enquête classique papier.

5.8.1. Les avantages

5.8.1.1. Variables gagnantes

En ce qui concerne les variables primaires des déplacements, les gains sont les suivants :

- Détection de déplacements motorisés non déclarés (car oubliés)
- Gain en précision sur les durées et les distances.
- Le carroyage devient superflu
- Nouvelles informations sur l'itinéraire (les variables cordon deviennent superflus).
- Informations sur la multi-modalité

5.8.1.2. Gains en méthodologie

En ce qui concerne la méthodologie d'enquête, les avantages sont :

- Il n'y a plus d'enquêteur à domicile.
- Les informations sur les conditions de déplacements sont mutualisées (grève, panne TC, météo)
- Le « fardeau » est minimisé pour l'enquêté. Porter un traceur pendant 1 semaine est moins pénible que recevoir à domicile et répondre pendant deux heures à une interview, sans tenir compte du risque d'expédier l'entretien par manque de temps.
- Une EGT par GPS coûte moins qu'une enquête classique, une fois l'investissement de départ réalisé. L'estimation financière ne fait pas partie de la phase 1 de cette recherche mais on trouvera en annexe 5 une première estimation (2,1 M€ dont 30% pour récompenser les participants) qu'il faudra affiner lors de la phase 2.

5.8.2. Les inconvénients

5.8.2.1. Variables perdantes

5.8.2.1.1. Les motifs

Les motifs non obligés (achat, loisirs, affaires personnelles et leurs sous-motifs respectifs) ne peuvent pas toujours être distingués. Comment remédier à cette incertitude ? Il faut garder le principe de minimiser le fardeau sur l'enquêté, donc ne rien lui demander, excepté d'allumer/éteindre le traceur et le porter/retirer autour du cou.

Pour lever les incertitudes sur les motifs, nous évoquons cinq idées mais à ce stade il n'y a pas encore de préconisations :

- Un meilleur **filtrage** des points GPS par les paramètres DOP (voir paragraphe 3.1.2). Jusqu'à maintenant, seul le HDOP a été utilisé. Il serait intéressant d'exploiter les autres XDOP ainsi que le paramètre de nombre de satellites vus à chaque instant.
- La mise en place d'une **enquête légère de suivi par téléphone**. Ce type d'entretien ne doit pas durer plus de quatre minutes pour sept jours de déplacements, pour ne pas déranger et dissuader les enquêtés de participer à une autre enquête du même type dans le futur. Donc les questions doivent être courtes, précises et fermées. Par exemple : « La semaine dernière, mardi, vous êtes sorti vers 18h15 de chez vous et vous êtes revenu vers 19h. Etait-ce pour faire des achats ou pour affaires personnelles ? Ensuite, mercredi vous êtes sorti vers ... ». Idéalement, le système-expert génère automatiquement et de manière personnalisée ce petit questionnaire sur les motifs indéterminés pour chaque individu enquêté. Le problème de cette enquête de suivi est qu'elle interroge sur les déplacements de la semaine précédente, en supposant que le passage dans le système-expert des données GPS commence dès réception des traceurs, c'est-à-dire au mieux le mercredi suivant la semaine d'enquête. Il y aura forcément des oublis et des confusions entre les dates chez les enquêtés.
- D'où l'autre idée alternative qui consiste à mettre en place, avec le GPS, un système **d'envoi des données** en fin de journée d'enquête par GSM/GRPS (voir paragraphe 3.4.3.). Le traceur envoie les données GPS à un serveur à distance, qui analyserait automatiquement en fin de journée les traces et générerait un questionnaire personnalisé au quotidien sur les ambiguïtés de variables des déplacements de la journée. Le lendemain, une équipe s'occuperait de la vérification visuelle puis, en

soirée, l'enquêté serait interrogé par téléphone pour lever les indéterminations des déplacements de la veille, l'interview ne durerait pas plus d'une minute. A ce moment, l'enquêté n'aura pas encore oublié ses déplacements de la veille. Mais il faut que l'enquêté soit prévenu et accepte d'être appelé tous les soirs pendant une minute.

- Le questionnaire individuel simplifié comportait des questions sur les lieux les plus fréquentés *habituellement*, en distinguant les jours de semaine des week-ends, comme cela est fait sur l'enquête de Cincinnati. Il faudrait en fait demander à l'enquêté de remplir ce questionnaire, **non pas avant l'enquête, mais après**, c'est-à-dire le dimanche soir. Les questions porteraient alors sur les lieux fréquentés au cours de la semaine passée. Cette nouvelle approche est cependant incompatible avec l'envoi des données GPS en fin de journée d'enquête. Elle ne peut marcher que si les traceurs sont récupérés après la semaine d'enquête, avec le questionnaire a posteriori.
- Une autre idée serait de **remettre à plat complètement la nomenclature des motifs** et d'opter pour la simplification, quitte à regrouper des motifs de manière un peu brutale car de toute façon, les analyses se feront par motifs regroupés, sauf pour des études très spécifiques. C'est un débat à lancer au sein du Comité de suivi et au CERTU qui reste le garant de la méthodologie EMD en France.

5.8.2.1.2. Les très courts déplacements ou trajets à pied

C'est le problème le plus embarrassant pour la nouvelle méthodologie. L'enquête par GPS fait **perdre** un certain nombre de déplacements et de trajets à pied, ceux qui sont très courts, pour deux raisons. Soit le déplacement ne peut être extrait du nuage de points parasites, soit le temps de démarrage à tiède ou à froid n'a pas permis de localiser le trajet de rabattement à pied entre un lieu fermé vers un autre lieu fermé (transition in-out-in). Mais pour tempérer, il faut dire que l'enquête papier n'est pas exempte de défauts sur cette question des très courts déplacements. D'une part, la définition d'un déplacement a changé entre l'actuelle EGT et les précédentes puisque le carroyage n'est plus pris en compte (un déplacement doit faire au moins 50 m). D'autre part, certains de ces déplacements très courts sont déclarés dans l'enquête classique, d'autres non car ils sont soit oubliés par l'enquêté soit celui-ci considère de lui-même que cela ne vaut pas la peine d'en parler (par exemple descendre en bas de son immeuble pour aller acheter des cigarettes) pour raccourcir l'interview. Il y a donc un manque d'homogénéité du recueil d'informations par l'EGT classique. Quoi qu'il en soit, il

est indispensable de résoudre ce problème des très courts déplacements pour donner du crédit à l'EGT par GPS. La piste à explorer dans la phase 2 de cette recherche sera l'hybridation des signaux GPS et des signaux locaux de type Wifi pour « augmenter » la localisation.

5.8.2.1.3. Variable conducteur/passager/taxi

Il n'est pas possible de savoir systématiquement à partir des traces GPS si l'individu est conducteur ou passager dans un véhicule particulier. En recoupant avec les informations connues sur les caractéristiques individuelles et du ménage auquel il appartient, on peut exclure le mode conducteur si l'individu n'a pas de permis de conduire ou s'il a moins de 16 ans. Attention, il peut ne pas posséder de voiture mais être conducteur d'une voiture empruntée. De même, il peut être passager dans un taxi. On peut recouper les traces GPS des mêmes membres d'un ménage. Par exemple, si un couple se retrouve dans une voiture, l'un est nécessairement conducteur, l'autre passager, et pour le savoir il faut analyser les modes de déplacements ou de trajets de chacun après leur séparation, ou plus simplement interroger l'individu lors de l'enquête de suivi.

5.8.2.1.4. Variables complémentaires

L'EGT par GPS fait perdre toutes les variables complémentaires sur les tournées, le type de stationnement, le titre TC, le remboursement, le transport d'objets lourds ou d'animaux. Seule l'enquête de suivi ou l'enquête ménage-individu permettra de recueillir ces informations qui sont des variables secondaires mais importantes pour certaines utilisations. Par exemple, la question « Portiez-vous des objets lourds ? » peut paraître anecdotique. Pourtant, elle est essentielle en modélisation du choix modal car elle permet d'exclure certains déplacements qui n'avaient pas le choix du mode de la base de données désagrégées.

5.8.2.2. Problèmes méthodologiques

L'EGT par GPS crée de nouveaux problèmes méthodologiques.

5.8.2.2.1. L'oubli du traceur

Nous avons constaté au cours de notre expérimentation une douzaine d'oublis du GPS sur environ 650 déplacements (2%), et ce malgré le protocole très directif imposé aux volontaires (porter le traceur autour du cou en sortant le matin et ne plus y penser). Ces **oublis étaient tous dus au fait que le volontaire n'avait pas porté le traceur autour du cou** comme exigé mais dans sa poche ou son sac. Ce faible taux est cependant le plus faible atteint, en comparaison des enquêtes GPS déjà réalisées à Cincinnatti et à Sydney et dans le domaine de l'épidémiologie (Oliver, 2010). Il est dû en grande partie à la mise en place d'un système automatisé d'envoi de SMS pour rappeler au participant d'allumer le traceur le matin au réveil, etc. Ce système n'a pas été utilisé ni dans les enquêtes GPS de Cincinnatti et de Sydney, ni dans les enquêtes GPS conduites dans le domaine de l'épidémiologie.

Nous recommandons que les traceurs soient équipés d'une dragonne, avec des couleurs différentes pour les différents membres d'un même ménage.

5.8.2.2.2. La logistique des traceurs

Par exemple, supposons un échantillon de 8000 ménages soit environ 20 000 individus, une durée d'enquête de 10 mois soit 40 semaines. Il y a donc 500 individus suivis par GPS chaque semaine, soit 500 traceurs en rotation. Il faut tenir compte du délai de récupération des traceurs la semaine suivante, donc il faut disposer d'un stock de 500 autres traceurs pour lancer la vague suivante de l'enquête. Il faut aussi tenir compte du taux de non-retour des traceurs. Bref, un volume de 1300 traceurs paraît un minimum. Comment gérer la logistique de 1300 traceurs en rotation ? Il est clair que seuls des professionnels de la logistique sont capables de prendre en charge ce problème. Par exemple, ils peuvent utiliser le système des codes-barres. Si la solution à terme est d'utiliser les smartphones des individus, cela simplifiera évidemment la logistique mais un sous-échantillon d'individus porteurs d'un boîtier traceur spécifique sera quand même nécessaire, car tous les individus ne seront pas possesseurs d'un smartphone.

5.8.2.2.3. Le manque d'autonomie des batteries

Dans notre expérimentation, il était demandé au volontaire de recharger deux fois la batterie dans la semaine. C'est en effet un « fardeau » supplémentaire lorsqu'il s'agit d'un traceur dédié. Mais si la solution du smartphone est retenue un jour, le rechargement de la batterie ne sera pas perçu comme un fardeau. En effet et paradoxalement, les propriétaires de smartphone ont pris l'habitude de recharger tous les jours leur appareil, voire deux fois par

jour, car les applications utilisées sont très consommatrices d'énergie. Par ailleurs, on espère beaucoup des batteries du futur (voir paragraphe 3.5 sur les smartphones).

5.8.2.2.4. Cas des enfants de 5 à 11 ans

L'EGT par GPS atteint ses limites sur cette question. C'est un véritable problème car on peut difficilement imaginer de confier un smartphone ou un traceur GPS à un enfant de 5 ans. S'il faut faire comme à Cincinnatti, il faudra le faire, c'est-à-dire conduire une enquête classique papier adaptée à ces enfants sur un jour seulement. Sur cette question, la présente recherche n'apporte aucune proposition. Dans l'estimation financière en annexe 5, le cas des enfants est pris en compte.

5.8.2.2.5. Questionnaires ménages et individus

Ces 2 questionnaires ne sont pas facultatifs dans une EGT et ce n'est pas le traceur GPS qui les remplira. Le principe étant toujours de minimiser l'intervention humaine, on peut envisager un questionnaire téléphonique ou un questionnaire auto-administré comme pour le RGP. Pour les variables complémentaires des déplacements, certaines questions peuvent être posées à ce moment. Dans la phase 2, il faudra interroger les instituts de sondage spécialisés pour bénéficier de leur expérience.

5.8.2.2.6. Question de la récompense des participants

Nous pensons que cette question est légitime aujourd'hui et qu'il faudra bien un jour lancer un véritable débat pour trancher cette question. Il nous semble difficile de nos jours de demander à des individus de participer gratuitement à une EGT par GPS, d'être suivis par GPS pendant une semaine soit par smartphone soit par traceur GPS dédié, sans compter les tâches secondaires demandées (répondre à un questionnaire papier simplifié, le renvoyer, retourner le traceur, répondre à l'enquête de suivi, etc). Un montant de 30€ semble un minimum pour motiver le participant. Mais il faut le prévoir dans le budget ($30 \times 20\ 000 = 600\ 000$ €). C'est effectivement un investissement burd, inédit, mais qui peut être rentable si les données recueillies sont complètes, propres, fiables, faciles à traiter et à redresser et disponibles rapidement. L'estimation sommaire présentée en annexe 5 en tient compte.

6. Conclusions et perspectives

Ce projet s'inscrit dans une vision à long terme. L'EGT qui a fait ses preuves depuis 40 ans, n'existera plus dans sa forme actuelle. Il est probable que les planificateurs des transports préféreront avancer à petits pas dans la modernisation de l'EGT et donc que l'EGT intégrale par GPS ne se substituera pas tout de suite à l'EGT classique (la prochaine n'est pas encore prévue mais devrait se réaliser en 2018-2019). Il reste donc six à sept ans pour préparer l'avenir de l'EGT et il ne faut pas attendre 2016 pour le faire. Cette phase 1 de la recherche a montré qu'il est possible de mettre en oeuvre l'EGT intégrale par GPS sous certaines conditions dont une des plus importantes est l'amélioration des traces GPS en amont due à l'inadaptation des traceurs du marché aux besoins de l'EGT. Nous continuerons à y travailler dans la phase 2 de cette recherche. L'EGT intégrale par GPS permettra de s'affranchir des enquêteurs à domicile donc de diminuer le coût global. Les arguments en sa faveur sont le moindre désagrément par rapport à un long entretien en face-à-face, le gain de précision pour certaines variables fondamentales caractérisant un déplacement (durée, distance, localisation à l'adresse postale) et l'apport de nouvelles informations sur les itinéraires. Cette voie est encourageante compte tenu des perspectives d'amélioration de la qualité de service des systèmes satellitaires (apport du multi-constellation, des nouveaux services Galileo, interopérabilité) et de la consommation batterie à long terme. En revanche, de nouveaux problèmes apparaissent, plutôt d'ordre social et organisationnel : la question de l'acceptabilité d'être suivi par GPS pendant une semaine (sentiment d'être surveillé en permanence), la contrainte d'un suivi téléphonique quotidien pour valider ou préciser certaines informations qui pourrait décourager l'enquêté, la nécessité de motiver les enquêtés par une récompense (à vérifier empiriquement).

Evidemment, opter pour une nouvelle méthodologie d'enquête suppose une révolution à la fois des esprits et des méthodes¹⁰. Pour des raisons d'acceptabilité, il pourrait y avoir une phase de transition où une sorte d'EGT « mixte » mêlant l'EGT traditionnelle et l'EGT par GPS serait à imaginer. Le projet d'expérimentation d'une EMD mixte par le CERTU en 2013-2014 dans des villes de province va dans le bon sens. On peut aussi expérimenter l'application de cette méthodologie souple pour des enquêtes ponctuelles sur une aire restreinte (une enquête ménages déplacements sur une Ville nouvelle, une enquête vélo sur le territoire d'une Communauté de communes, une enquête de suivi des participants à un Plan de déplacements d'entreprise, une enquête origine-destination des usagers d'une ligne de bus ou d'un péage autoroutier) et plus généralement dans toute enquête mobilité.

¹⁰ "Une vérité nouvelle en science n'arrive jamais à triompher en convainquant les adversaires [...] mais plutôt parce que finalement ces adversaires meurent et qu'une nouvelle génération grandit à qui cette vérité est familière." Max Planck, physicien. Citation tirée de "Autobiographie scientifique", Paris. Albin Michel, 1960.

Quant au développement d'un logiciel-système expert, il constitue une tâche très complexe, qui relève encore aujourd'hui en France de la recherche. Il demandera un investissement lourd, même si on peut partir d'outils existants développés à l'IFSTTAR, à l'Université de Sydney (logiciel G-TO-MAP) ou de Montréal. Nous laissons à nos partenaires l'IFSTTAR et le CERTU la tâche de mise au point du logiciel système-expert qui a en fait commencé depuis plusieurs années. Mais si sa disponibilité à court terme n'est pas possible pour diverses raisons (technique, financière, sociale, etc), on peut toujours envisager une solution se basant sur le travail que l'on a effectué au cours de notre expérimentation. Le logiciel système-expert est remplacé par une petite équipe de techniciens (une vingtaine) bien formés à l'identification visuelle et manuelle des variables à partir des données GPS et du SIGR. Cette intervention humaine en régie est déjà indispensable même avec un logiciel système-expert. Cette méthode coûterait de toute façon beaucoup moins cher qu'une équipe de 200 enquêteurs se déplaçant à domicile. A aucun moment l'individu n'est sollicité pour un rendez-vous à domicile.

Comment voyons-nous la phase 2 ? Il s'agit essentiellement de travailler sur une solution technologique d'amélioration des traces GPS en amont. Cette amélioration concerne deux aspects : la continuité des signaux GPS et la réduction des points parasites autour d'un lieu d'activités. Pour ce faire, l'hybridation de technologies est la solution d'un futur système. Nous proposons donc de développer une application sur smartphone combinant trois technologies : GPS, Wifi et capteur inertiel. Chacune de ces technologies prise séparément est tout à fait pertinente mais chacune a des limites. C'est en exploitant leurs complémentarités que l'on parviendra à mettre en place un traceur GPS adapté aux besoins de la nouvelle EGT. Une quatrième technologie (GSM/GPRS) permettrait l'envoi des données à distance.

De manière un peu plus précise, nous envisageons de réaliser les tâches suivantes :

- Spécifications traceur : définition objectifs, cas d'usage, fonctions, caractéristiques techniques ;
- Etude et maquettage traceur sur smartphone, choix du système d'exploitation, incluant l'envoi de données à distance ;
- L'expérimentation sur un échantillon léger de ménages, tous les membres de plus de 12 ans étant équipés de l'application sur leur smartphone, pour valider le protocole d'utilisation et mettre en œuvre la logistique ;
- Spécifications d'un traceur spécifique (boîtier) pour les personnes ne disposant pas de smartphone ;

- Elaboration d'un plan de sondages pour une enquête (taille, grappes, etc) à terme et évaluation précise du coût d'une EGT intégrale par GPS.

C'est donc un programme clair et concret de poursuite de la recherche qui est proposé.

Bibliographie

- 1) ARMOOGUM J., HUBERT J.-P., BONNEL P., MADRE J.-L. - "Préparer la prochaine enquête nationale transport avec un regard international" - Rapport IFSTTAR pour Predit 3 (2007)
- 2) ASCHLEY D, MERZ S., RICHARDSON T, YOUNG D. - "Recent information on the under-reporting of trips in household travel survey" - The Urban Transport Institute, Taggerty, Australia. www.tuti.com.au (2010)
- 3) BRICKA S., SEN S, PZLETI R., BHAT C. - "An Analysis of the Factors Influencing Differences in Survey-Reported and GPS-Recorded Trips" - Texas Transportation Institute (2010)
- 4) CHAIX B., KESTENS Y. – « Etude Record GPS ». Diaporama présenté à l'IFSTTAR le 1/12/2011.
- 5) EINSTEIN A. - « La Théorie de la relativité restreinte et générale. Exposé élémentaire ». Editions Gauthier-Villars, chapitre XXIII, pages 87 à 91 (1916)
- 6) FLAVIGNY P.-O., HUBERT J.-P., MADRE J.-L. - "Analyse de trafic routier observé par GPS et comparaison avec d'autres sources statistiques". Rapport IFSTTAR pour l'ADEME (1999)
- 7) GIAIMO G., ANDERSON R., WARGELIN L., STOPHER P. - "Will It Work? Pilot Results from the First Large-Scale GPS-Based Household Travel Survey in the United States." 89ème Conférence annuelle TRB à Washington, D.C. (2010).
- 8) GILLIERON P.-Y. « Navigation pédestre: réponses technologiques face aux enjeux de la mobilité piétonne sécurisée ». Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Laboratoire de Topométrie. Journée Scientifique GIS ITS Bretagne. 11 juin 2008
- 9) GREAVES S. – "Global Positioning Systems and Travel Surveys: the Australian Experience". Présentation à l'IFSTTAR. 24 juin 2011.
- 10) MUKARAMI E., MOHAMMADIAN K. Draft of the Subcommittee TRB Annual Meeting New Technology, January 12, 2010
- 11) MARCHAL P., YUAN S. et FLAVIGNY P.-O.: "Person-based GPS component: preparation of the next french NTS (ENT 2007), Cost 355 Action Changing behaviour towards a more sustainable transport system", Namur Conference. (2006)
- 12) MARCHAL P., MADRE J.-L. et NGUYEN THANH-TU : "Combining a lightened conventional questionnaire with a person-based GPS component for longer survey period and response burden reduction", IFSTTAR-DEST. NTTS 2011 (New Techniques and Technologies for Statistics), 22-24 February 2011, Brussels

- 13) OLIVER M., BADLAND H., MAVOA S., DUNCAN M., DUNCAN S. – “Combining GPS, GIS and Accelerometer : Methodological issues in the assessment of location and intensity of travel behaviours”. *Journal of Physical Activity and Health*, 2010, 7, 102-108.
- 14) PEARL J. - « Réseaux bayésiens : Un modèle de mémoire Individu-Activée pour le raisonnement fondé ». Dans les démarches des Conférences de la société de la Science cognitive, Université de Californie, Irvine, CA, pp. 329-334, 15 au 17 août 1985.
- 15) ROFIQUE J., ALUN H., KILLPACK C. – “National Travel Survey 2011 GPS Pilot. Field Report“, prepared for the Department for Transport (2011)
- 16) STOPHER P., CLIFFORD E., ZHANG J., FITZGERALD C. – “Deducing Mode and Purpose from GPS Data”. 87ème Conférence annuelle TRB à Washington, D.C. (2008)
- 17) STOPHER P., CLIFFORD E., ZHANG J., et FITZGERALD C. (2008). Deducing mode and purpose from GPS data. Working Paper ITLS-WP-08-06, Institute of Transport and Logistics Studies. <http://www.itls.usyd.edu.au>
- 18) STOPHER P., WARGELIN L. – “Conducting a household travel survey with GPS : reports on a pilot study”. WCTR Lisbonne (2010)
- 19) TRB – “Collecting, Processing, and Integrating GPS Data into GIS. A Synthesis of Highway Practice” (2002)

Annexe 1 : Questionnaire individu simplifié

1. NOM :

Prénom :

2. Age ou tranche d'âge (de 5 ans) :

3. Situation familiale :

4. Nombre d'enfants présents au foyer :

5. Age des enfants :

6. Profession : retraitée

7. Possession du permis de conduire :

8. Nombre dans le ménage : 1 voitures : 0 2R motorisés : 0 vélos :
(scooter, moto)

Informations sur des adresses :

1) Adresse du domicile :

2) Adresse du lieu habituel de travail :

3) Adresse de l'école (précisez collège/lycée/université) :

4) Adresse du lieu habituel du déjeuner en semaine : au domicile

5) Adresses des deux lieux d'achat les plus fréquentés :

6) Adresses d'un ou deux lieux de **visite** fréquents (école, parents, amis, club de sport, hôpital, médecin, maison de retraite, etc). Précisez si c'est le week-end (samedi, dimanche).

7) Adresses d'un ou deux lieux d'**accompagnement** fréquents (parents, amis, club de sport, hôpital, médecin, maison de retraite, etc)

Votre numéro de portable :

Annexe 2 : Extrait de la base finale des déplacements

Enquête GPS										Enquête Papier												
NUMPERS	Date	DPL	Commune origine	Commune destination	heure départ	heure arrivée	Distance (réseau)	Mode	Moif origine	Moif Destination	NUMPERS	Date	DPL	Commune origine	Commune destination	heure départ	heure arrivée	Distance (carro)	Mode	Moif origine	Moif Destination	
3	Lundi 22 Mars	1	75109	75109	08:41	08:49		Bus	D	T	3	Lundi 22 Mars	1	75109	75109	08:25	08:40		MAP	D	T	
3	Lundi 22 Mars	2	75109	75109	Periode de signal	18:55		Mitro	D	D	3	Lundi 22 Mars	2	75109	75109	18:40	18:40		MAP	D	D	Loisirs
3	Lundi 22 Mars	3	75109	75119	19:11	19:40		Mitro	f. perso ou Lois	D	3	Lundi 22 Mars	3	75109	75119	19:05	19:20		Mitro	Loisirs	D	D
3	Lundi 22 Mars	4	75119	75109	22:02	22:15		Mitro	f. perso ou Lois	D	3	Lundi 22 Mars	4	75119	75109	22:00	22:15		Mitro	Loisirs	D	D
3	Mardi 23 Mars	1	75109	75109	08:48	09:02		MAP	D	T	3	Mardi 23 Mars	1	75109	75109	08:30	08:45		MAP	D	Achat	T
3	Mardi 23 Mars	2	75109	75109	Periode de signal	21:59		Mitro	Periode de signal	f. perso ou Lois	3	Mardi 23 Mars	2	75109	75109	08:32	08:45		MAP	Achat	T	Aif. perso
3	Mardi 23 Mars	3	75102	75109	23:18	23:18		Mitro	f. perso ou Lois	D	3	Mardi 23 Mars	3	75102	75109	19:45	19:55		MAP	Achat	T	Loisirs
3	Mardi 23 Mars	4	75109	75109	08:16	08:39		Bus	D	Periode de signal	3	Mardi 23 Mars	4	75109	75109	23:20	23:25		MAP	Loisirs	D	D
3	Mardi 23 Mars	5	75109	75109	Periode de signal	13:11		Mitro	f. perso ou Lois	D	3	Mardi 23 Mars	5	75109	75109	13:10	13:10		Mitro	Achat	Aif. perso	D
3	Mardi 23 Mars	6	75109	75111	13:22	13:39		Mitro	f. perso ou Lois	D	3	Mardi 23 Mars	6	75111	75109	12:50	13:00		Mitro	Achat	Aif. perso	D
3	Mardi 23 Mars	7	75109	75109	21:23	21:42		MAP	T	D	3	Mardi 23 Mars	7	75109	75109	13:35	13:35		Mitro	Aif. perso	D	
3	Mardi 23 Mars	8	75109	75109	08:33	08:47		MAP	D	T	3	Mardi 23 Mars	8	75109	75109	21:45	21:40		MAP	D	T	
3	Mardi 23 Mars	9	75109	75109	19:42	19:53		MAP	D	T	3	Mardi 23 Mars	9	75109	75109	08:45	08:00		MAP	D	T	
3	Vendredi 26 Mars	1	75104	75104	13:58	14:20		Mitro	D	f. perso ou Lois	3	Vendredi 26 Mars	1	75109	75104	14:20	14:20		MAP	D	Loisirs	D
3	Vendredi 26 Mars	2	75112	75109	15:11	16:03		Mitro	f. perso ou Lois	D	3	Vendredi 26 Mars	2	75112	75109	15:30	16:00		Mitro	Loisirs	Achat	D
3	Vendredi 26 Mars	3	75109	75109	16:04	16:39		Mitro	Aif. perso	Aif. perso	3	Vendredi 26 Mars	3	75112	75109	16:20	16:40		Mitro	Loisirs	Achat	D
3	Vendredi 26 Mars	4	75109	75109	16:56	17:03		MAP	Aif. perso	D	3	Vendredi 26 Mars	4	75109	75109	17:00	17:10		MAP	Achat	D	
3	Vendredi 26 Mars	5	75109	75101	23:14	23:39		Mitro	D	f. perso ou Lois	3	Vendredi 26 Mars	5	75109	75101	22:45	26:15:00		Mitro	D	Aif. perso	D
3	Vendredi 26 Mars	6	75101	75109	02:06	02:35		Nectilien	f. perso ou Lois	D	3	Vendredi 26 Mars	6	75101	75109	02:15	02:45		Nectilien	Aif. perso	D	D
3	Samedi 27 Mars	1	75109	75109	17:49	18:02		Mitro	D	f. perso ou Achat	3	Samedi 27 Mars	1	75109	75109	17:05	17:02		MAP	Achat	Aif. perso	D
3	Samedi 27 Mars	2	75109	75109	18:36	18:46		Mitro	f. perso ou Achat	D	3	Samedi 27 Mars	2	75109	75109	18:30	18:45		MAP	Achat	Aif. perso	D
3	Samedi 27 Mars	3	75109	75104	20:05	20:22		MAP	D	Aif. perso	3	Samedi 27 Mars	3	75109	75104	20:00	20:15		MAP	D	Aif. perso	D
3	Samedi 27 Mars	4	75104	75109	02:54	03:16		MAP	Aif. perso	D	3	Samedi 27 Mars	4	75104	75109	03:00	03:15		MAP	Aif. perso	D	
3	Dimanche 28 Mars	1	75109	75109	Periode de signal	18:06		Mitro	D	f. perso ou Lois	3	Dimanche 28 Mars	1	75109	75109	17:30	18:00		Mitro	D	Loisirs	D
3	Dimanche 28 Mars	2	75108	75109	20:01	20:57		Mitro	f. perso ou Lois	D	3	Dimanche 28 Mars	2	75108	75109	20:00	20:30		Mitro	Loisirs	D	
5	Lundi 15 Février	1	84046	75115	07:41	08:30		Mitro	D	T	5	Lundi 15 Février	1	84046	75115	07:40	08:40		Mitro	D	T	
5	Lundi 15 Février	2	75115	75115	18:17	18:06		Mitro	T	D	5	Lundi 15 Février	2	75115	75115	13:15	13:20		MAP	Loisirs	T	
5	Mardi 16 Février	1	84046	75115	07:27	08:14		MAP	D	T	5	Mardi 16 Février	1	84046	75115	07:15	08:15		Mitro	D	T	
5	Mardi 16 Février	2	75115	75115	13:00	13:07		MAP	T	f. perso ou Achat ou	5	Mardi 16 Février	2	75115	75115	13:15	13:30		MAP	Loisirs	T	
5	Mardi 16 Février	3	75115	75115	13:24	13:32		MAP	f. perso ou Achat ou	T	5	Mardi 16 Février	3	75115	75115	13:05	13:00		MAP	Loisirs	T	
5	Mardi 16 Février	4	75115	83064	Periode de signal	19:51		Mitro + VP	T	f. perso ou Lois	5	Mardi 16 Février	4	84046	83064	19:00	19:00		Mitro + VP	Accomp.	Loisirs	Accomp.
5	Mardi 16 Février	5	83064	84046	22:12	22:35		VP	f. perso ou Lois	D	5	Mardi 16 Février	5	83064	84046	22:10	22:20		Covoiturage	Loisirs	Accomp.	
5	Mardi 16 Février	6	84046	84046	22:20	22:29		VP	f. perso ou Lois	D	5	Mardi 16 Février	6	84046	84046	22:20	22:30		VP	Accomp.	Accomp.	
5	Mardi 16 Février	7	84046	75115	07:57	08:43		Mitro	D	T	5	Mardi 16 Février	7	84046	75115	08:00	08:45		Mitro	D	T	
5	Mardi 16 Février	8	75115	75115	11:56	12:28		MAP	Loisirs	T	5	Mardi 16 Février	8	75115	75115	12:00	12:05		MAP	Loisirs	T	
5	Mardi 16 Février	9	75115	75115	Periode de signal	17:58		MAP	Loisirs	T	5	Mardi 16 Février	9	75115	75115	13:15	13:20		MAP	Loisirs	T	
5	Mardi 16 Février	10	84046	84046	19:50	20:01		Vélo	D	f. perso ou Lois	5	Mardi 16 Février	10	84046	84046	19:50	20:00		Mitro	D	D	
5	Mardi 16 Février	11	84046	84046	22:20	22:29		Vélo	f. perso ou Lois	D	5	Mardi 16 Février	11	84046	84046	22:10	22:10		Vélo	Loisirs	D	
5	Mardi 16 Février	12	75115	75115	07:52	08:38		Mitro	D	T	5	Mardi 16 Février	12	84046	75115	07:50	08:39		Vélo	Loisirs	D	
5	Mardi 16 Février	13	75115	75115	12:13	12:22		MAP	Loisirs	T	5	Mardi 16 Février	13	75115	75115	12:05	12:10		MAP	Loisirs	T	
5	Mardi 16 Février	14	75115	75115	12:23	12:31		MAP	Loisirs	T	5	Mardi 16 Février	14	75115	75115	12:10	12:15		MAP	Loisirs	T	
5	Mardi 16 Février	15	84046	84046	20:00	20:03		Mitro + VP	f. perso ou Lois	D	5	Mardi 16 Février	15	84046	84046	18:08	18:00		Mitro	Loisirs	T	
5	Mardi 16 Février	16	84046	84046	23:22	23:51		VP	Loisirs	D	5	Mardi 16 Février	16	84046	84046	18:08	18:00		Mitro	Loisirs	T	
5	Vendredi 19 Février	1	84046	75115	11:14	12:03		Mitro	D	T	5	Vendredi 19 Février	1	84046	75115	11:10	12:00		Mitro	Loisirs	D	
5	Vendredi 19 Février	2	75108	75108	13:15	13:52		MAP	f. perso ou Aif. pe	Loisirs	2	Vendredi 19 Février	2	75108	75108	13:10	13:50		Mitro	Loisirs	D	
5	Vendredi 19 Février	3	75109	75101	15:33	16:39		MAP	f. perso ou Aif. pe	Loisirs	3	Vendredi 19 Février	3	75109	75101	15:30	16:35		Mitro	Aif. perso	Loisirs	
5	Vendredi 19 Février	4	75101	75101	15:45	16:05		Mitro	Loisirs	Aif. perso	4	Vendredi 19 Février	4	75101	75101	15:30	16:35		Mitro	Aif. perso	Loisirs	
5	Vendredi 19 Février	5	75101	84046	Periode de signal	17:51		Mitro	f. perso ou Achat	D	5	Vendredi 19 Février	5	75101	84046	16:35	17:40		Mitro	Loisirs	D	
5	Vendredi 19 Février	6	84046	84046	13:58	14:08		Vélo	D	Loisirs	5	Vendredi 19 Février	6	84046	84046	13:50	14:00		Vélo	Loisirs	D	
5	Vendredi 19 Février	7	84046	84046	16:46	16:57		Vélo	D	Loisirs	5	Vendredi 19 Février	7	84046	84046	16:30	16:40		Vélo	Loisirs	D	
5	Vendredi 19 Février	8	84046	84046	10:00	10:07		Vélo	D	Loisirs	5	Vendredi 19 Février	8	84046	84046	10:00	10:10		Vélo	Loisirs	D	
5	Vendredi 19 Février	9	84046	84046	11:07	11:19		Vélo	Aif. perso	Aif. perso	5	Vendredi 19 Février	9	84046	84046	11:00	11:20		Vélo	Loisirs	Aif. perso	
5	Vendredi 19 Février	10	84046	84046	11:44	11:52		Vélo	Aif. perso	Aif. perso	5	Vendredi 19 Février	10	84046	84046	11:20	11:50		Vélo	Loisirs	Aif. perso	
5	Vendredi 19 Février	11	84046	84046	15:23	15:32		Vélo	Aif. perso	Aif. perso	5	Vendredi 19 Février	11	84046	84046	15:20	15:30		Vélo	Loisirs	Aif. perso	

Annexe 3 : Procédure d'utilisation du traceur QStarz

Test du lundi ... au dimanche ...

- 1) Allumer le traceur le matin au réveil en position **LOG** (inutile de sortir le traceur de sa housse, il y a une fente sur le côté de la housse). La diode s'allume en **orange**.
- 2) Le poser près d'une fenêtre (après quelques minutes, la diode **orange** se met à clignoter, ce qui signifie que vous êtes localisé et que le traceur commence à enregistrer).
- 3) Avant de partir, le mettre autour du cou (ne plus pensez au traceur).
- 4) Le soir, quand vous êtes sûr de ne plus repartir, éteindre le traceur (position **OFF**).
- 5) Le lendemain matin.

Mercredi : prendre le 2^{ème} traceur. **Vendredi** : prendre le 3^{ème} traceur. Voir 1^{ère} étape (chaque traceur a une autonomie de 2 jours seulement). Recharger la batterie du 3^{ème} traceur samedi après-midi ou soir pendant 3h00 (éteindre le traceur pendant la recharge, ne pas oublier de le rallumer avant de sortir).

- 6) Vous recevrez un SMS tous les matins à 7h pour vous rappeler d'allumer le traceur (pour samedi, c'est à 8h00 et dimanche à 8h30. Si vous partez plus tôt, n'oubliez pas de le prendre avec vous).
- 7) **Questionnaire papier** : chaque jour, votre référent vous interrogera pendant 10 à 15 minutes sur vos déplacements **de la veille** en remplissant les questionnaires déplacements et trajets (si possible, le référent saisira le carroyage à partir du fichier « shape » fourni par le STIF. Sinon, toute indication sera utile pour nous permettre de retrouver le carreau). Vous serez donc interrogé **par téléphone** mardi, mercredi, jeudi, vendredi et le lundi suivant pour les déplacements de vendredi-samedi-dimanche.

Merci de votre coopération

Annexe 4 : Procédure d'importation des enregistrements GPS dans le SIGR

Rappel : Une carte est créée à partir du géoïde terrestre, qui est une représentation fidèle de la surface terrestre. En fait, le géoïde n'est jamais utilisé en tant que tel en cartographie. On utilise plutôt une approximation du géoïde, très souvent représentée par un ellipsoïde de révolution. Cette approximation forme ce que l'on appelle le **système géodésique**. C'est un système de référence permettant d'exprimer les positions au voisinage de la Terre. Il existe plusieurs systèmes géodésiques, les uns se différenciant des autres par les dimensions de l'ellipsoïde. Parmi les plus connus, on peut citer le système géodésique WGS84 (World Geodetic System) mondialement utilisé, et le RGF93 (Réseau Géodésique Français) utilisé en France.

Le traceur enregistre un point toutes les 5 secondes avec les attributs de coordonnées en longitude, latitude, altitude, la vitesse, l'heure et le HDOP.

Le logiciel Travel Recorder associé au traceur permet d'exporter les données dans un fichier csv. On doit d'abord lire les coordonnées dans le système géodésique mondial WGS84 puis les reprojeter dans le système géodésique français RGF93 appelé Lambert 93.

La procédure pour importer ce fichier dans le SIGR est donc la suivante :

- 1) Remplacer dans le CSV avec un éditeur comme le bloc-notes, toutes les , par des ; puis enregistrer.
- 2) Editer le fichier schema.ini (il faut avoir les fichiers cachés accessibles) dans le même dossier et renommer la ou les ligne(s) « Format » CSVDelimited passe à Delimited (;). Sauvegarder et fermer.
- 3) Dans ArcMap : ajouter les données CSV avec le petit + jaune. Puis faire clic droit, Afficher les données X,Y
- 4) Garder les valeurs par défaut : X à Longitude et Y à Latitude. Il dit qu'il ne reconnaît pas de système de coordonnées donc on va aller le sélectionner manuellement. Cliquer sur « Mettre à jour » puis « Sélection ». Remonter dans l'arborescence jusqu'à « Références spatiales » puis « systèmes de coordonnées géographiques » puis « monde » puis WGS 1984. Faire OK deux fois. Cela crée un événement avec une couche de point. Cette couche est temporaire, elle n'existe que dans le MXD et n'est pas enregistrée en dur. Faire clic droit et exporter les données, on aura une couche de point projetée en WGS 1984.
- 5) Si on travaille en Lambert 93, on peut faire une manipulation pour reprojeter la couche.

- 6) Dans ArcToolBox, Outils de gestion de données, projections & transformations, entités, prendre l'outil « projeter » et suivre la manip suivante :
- 7) Jeu de données ou classe d'entités en entrée : prendre la couche fictive : Evenements (nom du tableau Excel).
 - a. Système de coordonnées en entrée : grisé WGS 1984 c'est celle qu'on a déterminé manuellement.
 - b. Jeu de données ou classe d'entités en sortie : sélectionner le chemin que l'on veut et faire un shapefile ou une entité de GDB.
 - c. Système de coordonnées en sortie : cliquer sur le petit bouton au bout, et aller chercher la projection lambert 93 à Remonter comme tout à l'heure sur « Références spatiales » puis « systèmes de coordonnées projetées » puis « grilles nationales » puis « France » puis prendre le RGF Lambert 93.prj qui correspond à la projection Lambert 93 de la France entière.
 - d. Transformation géographique (facultatif). Dans notre cas cette ligne n'est pas facultative : il faut absolument choisir l'élément qui est proposé à savoir : RGF_1993_To_WGS_1984_1

Après il suffit de faire OK et on obtient la couche en Lambert 93

La couche de points peut ensuite être ajoutée à un projet mxd.

Annexe 5 : Estimation financière sommaire d'une EGT par GPS

Hypothèses principales :

- Durée de l'enquête : 10 mois (septembre à juin)
- 8000 ménages (au lieu de 18000), suivis sur une semaine (au lieu d'un jour)
- 90% suivis par smartphone, 10% par traceur GPS dédié
- Récompense de chaque individu : 30 €
- Durée d'analyse et saisie d'un déplacement en méthode visuelle : 6 minutes (ce temps sera réduit avec l'application GPS spécifique et le logiciel système-expert)
- Un seul questionnaire téléphonique de suivi après l'enquête : 5 minutes par individu
- Questionnaire téléphonique ménage et individu : 18 minutes par ménage (yc pause)

Coût 1 Récompense : 20000* 30€=600 000 €

Nb ménages	8 000
taille ménage	2,5
Nb individus	20 000
Nb déplacements/j	3,7
Nb jours d'enquête/sem	7
Nb déplacements total	518 000

Coût 2 applications : 18000*1€=18000 €

Coût 3 traceurs : 130*200€=26000 €

Durée enquête (mois)	10
Durée enquête (sem)	40
Nb individus/sem	500
Nb déplacements/j	3,7
Nb jours d'enquête/sem	7
Nb déplacements total/sem	12 950

Nb appli sur smartphone	18 000
Nb traceurs en rotation	130

Coût 4 logistique traceurs : 130*40€=5200 €

Durée analyse d'un déplacement (min)	6
Durée totale (h)	51 800
Nb jours (7h30/j)	6 907
Coût journalier de technicien (€)	180

Coût 5 (€) 1 243 200

Durée analyse d'un déplacement (min)	6
Nb déplacements d'un individu/sem	26
Durée d'analyse d'un individu (h)	2,6
Nb individus analysés par technicien/j	2,9

Nb techniciens/sem 35

Durée du suivi téléphonique par individu(min)	5
Durée totale (h)	1 667
Coût horaire enquêteur (€)	25

Coût 6 (€) 41 667

Durée du questionnaire téléphonique ménage et individu (min)	18
Durée totale (h)	2 400
Coût horaire enquêteur (€)	25

Coût 7 (€) 60 000

Coût 8 enquête classique enfants 6-11 ans : 50 000 €

Coût 9 recrutement des participants : 20 000 €

Coût 10 phase apurement et redressement : 70 000 €

Coût total (1+2+3+4+5+6+7+8+9+10)= 2 134 067 €

Option pour diminuer le coût : ne faire que les jours de semaine (donc 5 jours au lieu de 7).
On arrive à environ 1,75 M€.

