



**Directeur des publications**

André Bailly  
Ingénieur Géomètre ETP

**Directeur adjoint des publications**

Emmanuel Natchitz  
Enseignant-Chercheur ESTP

**Rédaction et administration XYZ**

2, avenue Pasteur  
94165 Saint-Mandé Cedex  
Tél. 01 43 98 84 80  
Fax 01 43 74 72 80

**Rédacteur en chef**

Jean-Pierre Maillard  
Urbaniste, Géomètre-Expert Foncier,  
Marne-la-Vallée

**Comité de Rédaction**

Stéphane Durand  
Enseignant-Chercheur - ESGT Le Mans  
Pierre Grussenmeyer  
Professeur des universités  
INSA de Strasbourg  
Michel Kasser  
Professeur des universités  
Directeur ENSG - Marne-la-Vallée

Tania Landes  
Maître de Conférences  
INSA de Strasbourg

**Responsable du site Internet**

Tania Landes

**Publicité**

Samuel Guillemin  
Tél. : 06 72 12 08 97  
communication@aftopo.org

**Conception et maquette**

Dorothée Picard

**Autre publication :** L'annuaire de l'AFT

**ALBEDIA IMPRIMEURS**

137, avenue de Conthe  
BP 337 15003 Aurillac Cedex  
Tél. : 04 71 63 44 60  
Fax : 04 71 64 09 09

**Dépôt légal**

3<sup>e</sup> trimestre 2007 ISSN 0290-9057  
N° CPPAP : 01 11 G 80 866

**Tirage de ce numéro :** 1600 ex

**Abonnement annuel**

France CEE: 83 €  
Etranger (avion, frais compris): 86 €  
Les règlements payés par chèques  
payables sur une banque située hors  
de France doivent être majorés de 10 €,  
sauf à utiliser l'identifiant international  
de compte IBAN  
FR08 3004 1000 0116 3000 3Y02 023  
Le numéro : 20 €  
Le bulletin d'adhésion est en p.64  
Membre du SPCS Syndicat de la Presse  
Culturelle et Scientifique

L'AFT n'est pas responsable des opinions  
émises dans les conférences qu'elle organise  
ou les articles qu'elle publie. Tous droits de  
reproduction ou d'adaptation strictement  
réservés.

Photo de couverture : © IGN

**La revue XYZ est éditée par l'Association Française de Topographie (AFT)**

Membre de la FIG (Fédération Internationale des Géomètres)   
2, avenue Pasteur - 94165 Saint-Mandé Cedex - Tél. : 01 43 98 84 80 - Fax : 01 43 74 72 80

Courriel : [info@aftopo.org](mailto:info@aftopo.org) • Site Internet : <http://www.aftopo.org>

**■ Editorial ..... 5**

**■ Info-Topo**

> Les informations de la profession..... 7

**■ Info-SIG**

> L'initiative du SEIDS ..... 13

**■ 3<sup>e</sup> Forum de la Topographie**

> Le positionnement en intérieur  
*Nel SAMAMA* ..... 16

> L'évolution de la navigation  
et cartographie routière, un exemple  
à suivre pour l'intérieur ?  
*Philippe SAINT-MARTIN* ..... 25

**■ Topographie :  
un demi-siècle d'évolution  
technologique (3/4)**

> L'informatique et le traitement des  
données



*Paul COURBON* ..... 29

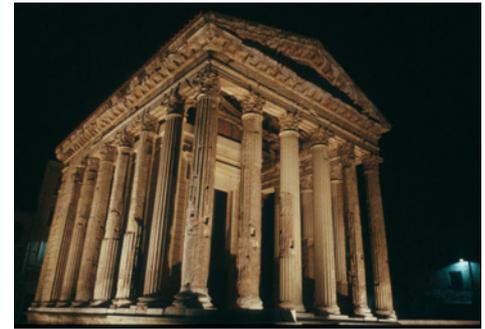
**■ Cadastre**

> Quantification globale des écarts  
géométriques entre plans cadastraux  
DGI et référentiels IGN dans le cadre  
du géoréférencement de la BD Parcellaire®  
en mode Image  
*François CHAHUNEAU - Hélène CLODOT* ..... 37

**■ La vie des écoles**

> Le rapprochement entre l'ENSG et l'ESGT :  
qu'en est-il au juste ?  
*Michel KASSER - Laurent POLIDORI* ..... 45  
Pour la recherche de nos annonceurs  
consulter la page 63.

**■ 3<sup>e</sup> Prix AFT 2006**



> Représentation 3D architecturale du temple  
d'Auguste et Livie à Vienne (Isère)  
*Céline RAVIER* ..... 46

**■ Topo vécue**

> Expéditions Polaires Françaises Missions  
Paul-Emile Victor - Extraits des souvenirs  
de la campagne "Groenland 1950"  
de la section "Géodésie"  
*Jean BOURGOIN* ..... 56

**■ Art et Géométrie**



> Nicolas Guiot et Mathieu Mercier  
au Parc Saint Léger  
*Jean-Pierre MAILLARD* ..... 58

**■ Livres ..... 60**

> Extrait de l'autobiographie de Louis Catinot  
"Lutte pour un avenir" : Naissance de  
l'Association Française de Topographie

**DANS LE PROCHAIN NUMÉRO D'XYZ n°113 :**

> Topographie : un demi-siècle d'évolution  
technologique (fin)  
> Le Quasi-géoïde libanais

*XYZ est depuis de nombreuses années partenaire du Géo-événement, lieu de rencontres, d'échanges, d'expositions et d'informations géomatiques où les conférences traitent de sujets multiples et divers. En 2007 le Géo-événement a notamment présenté les nouveautés des globes virtuels (il n'y a pas que Google Earth et le Géoportail...), le point sur les recherches en intégration de données, l'analyse de l'explosion des ventes de GPS en 2006 (un million d'exemplaires en France), l'information géographique au service de l'urbanisme, la place des infrastructures de données spatiales en relation avec celle du Géoportail, et l'évolution vers un nouveau référentiel parcellaire. Sur ce dernier thème, l'intervention de François Chahuneau mérite une trace écrite. Elle est relative à la quantification globale des écarts géométriques entre les plans cadastraux DGI et référentiels IGN dans le cadre du géoréférencement de la BD parcellaire en mode image. C'est pourquoi XYZ lui ouvre ses colonnes au moment où le produit IGN évolue vers la 3D.*

*Les organisateurs ont également été heureux d'inviter Albert Jacquard, scientifique et humaniste, appelé à s'interroger sur diverses problématiques, par exemple : "à l'heure du GPS, saurons-nous longtemps lire une carte ?" ou encore "Remplacer le savoir par la compréhension : jusqu'où ?". Ses réponses pleines de réflexions planétaires, sur le temps et sur l'homme, sont propres à la méditation : "Le temps suppose un événement", "Les images qui bougent empêchent d'écouter, de voir", "Il faut l'école du doute", "Il faut agir et non subir" en concluant sur la nécessité de "La rencontre de l'autre". Ses réflexions philosophiques ne l'ont pas empêché d'évoquer d'autres questions, mathématiques celles-là, tel le constat que tout nombre pair est la somme de deux nombres premiers, pas plus, sans qu'il soit possible de le démontrer.*

*Par ailleurs, comme XYZ le remarque régulièrement et s'en fait l'écho au plus près de l'actualité, chaque année a son lot d'anniversaires. Ainsi, dans le dernier numéro, la revue de l'AFT a rappelé la naissance de l'hélicoptère, il y a cent ans. Cette année-là, le Cadastre avait déjà justement cent ans et c'est pourquoi 2007 marque le bicentenaire de sa création. Pour l'occasion, le Service de la documentation nationale du Cadastre (SNDNC) de Saint-Germain-en-Laye s'ouvre au public le matin du 25 septembre 2007. A leur tour, nombre de directions départementales des services fiscaux communiqueront sur le sujet d'ici à la fin de l'année. Pour sa part la DGI organise une manifestation nationale au Sénat le 9 novembre 2007 et une exposition temporaire au Ministère. Elle tiendra également un stand au Salon des maires et des collectivités locales en novembre prochain. On est loin des fastes de 1989.*

*2007 rappelle également qu'il y a cinquante ans Paul-Emile Victor animait les expéditions polaires françaises (EPF). Dans ce numéro, Jean Bourgoïn livre le récit de la partie géodésique de cette entreprise qui montre, s'il en était besoin que les géodésiens de l'époque n'avaient "pas froid dans le dos".*

*On le sait déjà, fin 2008, c'est au tour de l'AFT d'être, pour ses trente ans, sur la liste des nominés. Louis Catinot, premier président de l'association, n'oublie pas le moment fondateur de sa création dans son autobiographie. La rubrique "Livres" publie les meilleures pages de son ouvrage à ce sujet.*

*Et enfin, pour marquer la date de 2008, en collaboration avec l'Ecole chez soi, l'AFT est d'ores et déjà engagée dans le renouvellement de son site Internet. Une opération importante pour la visibilité de notre association !*

**Jean-Pierre Maillard**

# Le rapprochement entre l'ENSG et l'ESGT : qu'en est-il au juste ?

■ Michel KASSER - Laurent POLIDORI

Dans la petite sphère de la géomatique française, c'est une information qui est connue depuis longtemps : le gouvernement français a demandé à l'IGN et au CNAM de faire se rapprocher autant que possible deux des formations qu'ils pilotent, celles d'ingénieurs de l'ENSG et de l'ESGT. Dans les dernières années la Commission du Titre d'Ingénieur, à son tour, a insisté sur l'utilité de mener cette démarche jusqu'à son terme, en reprenant cette recommandation lors des dernières accréditations des deux écoles, respectivement obtenues jusqu'en 2009 et 2010. Les objectifs sont fondés sur l'idée de faire travailler ensemble, et donc bien faire se connaître ceux qui, dans deux zones différentes mais voisines de la géomatique, sont destinés à tous les secteurs d'emploi, fonctions publiques d'État et territoriale, géomètres-experts, et tous les autres emplois privés. Cette décision affichée depuis 2000 a connu divers épisodes, et une information sur les étapes récentes intéresse les lecteurs d'XYZ.

Depuis la rentrée de septembre 2006, les élèves ingénieurs se sont vus librement ouvrir les portes des spécialisations de 3<sup>e</sup> année des deux écoles. Cette ouverture a été étendue aux ingénieurs géomètres de l'ESTP et de l'INSA-Strasbourg. Nous ne sommes ici d'ailleurs pas très loin de ce qu'ont connu les ESGT jusqu'en 1972, quand ceux qui faisaient l'option Topographie venaient la faire à l'ENSG.

Les travaux préparatoires à la mise en commun de la première année sur le site du Mans ont, en 2006, rapidement achoppé sur les difficultés techniques d'harmonisation des contenus pédago-

giques. Ceux-ci sont assez voisins certes, mais pas au point de les égaliser sans entrer dans des opérations ayant des incidences majeures sur les autres années des cycles, et ceux d'autres cycles ayant recours aux mêmes enseignants par contre-coup. Comme de toute façon l'ENSG devait procéder à une réflexion sur les métiers en aval de l'école, en lien avec l'accroissement marqué de son flux d'élèves non destinés à l'IGN, il avait été décidé de ne modifier les contenus pédagogiques qu'une fois connus les résultats de cette enquête. Celle-ci, menée avec l'aide active de tous les acteurs importants de la géomatique française, a été présentée et validée à la fin mai 2007. Depuis lors les équipes pédagogiques des deux écoles ont remis le projet sur le métier, l'ESGT ayant aussi procédé à quelques retouches, et les cycles ont fait l'objet d'une première harmonisation. Il reste encore pas mal à faire, mais rien ne semble actuellement insurmontable.

Les directions générales de l'IGN et du CNAM sont donc convenues de tout faire pour que la rentrée 2008 de tous les élèves ingénieurs de première année des deux écoles (un total qui pourrait donc atteindre 140 à 150 élèves selon les recrutements) se fasse au Mans, les étudiants se séparant ensuite pour poursuivre leurs cursus dans leurs écoles respectives. Les locaux y seront provisoirement un peu exigus, mais une extension des bâtiments a été mise à l'étude, avec le soutien indéfectible des collectivités territoriales (Communauté Urbaine du Mans, Département de la Sarthe, Région des Pays de la Loire), et bien entendu de l'État. Rendez-vous donc en 2008 pour faire le point sur la réalisation de ce projet, majeur pour l'avenir de la géomatique française !

# Optech



## Nouveau !

### ILRIS-3D VP

Toutes les caractéristiques de la version standard :  
portée , précision, cadence de lever

Interface utilisateur simplifiée

## Un tarif "budget"

- ✦ Domaine d'intervention de 3 à 850m (1300m avec l'option ER)
- ✦ Cadence de lever : 2500 points par seconde
- ✦ Précision de positionnement à 100m : 8mm
- ✦ Laser classe 1 sans aucun danger pour les yeux
- ✦ Mise en oeuvre par une seule personne
- ✦ Logiciel d'alignement et de géoréférencement QT Modeler inclus

## Le positionnement en intérieur

■ Nel SAMAMA

*Avec l'essor du nomadisme et de la mobilité, un besoin fort en localisation émerge. Ce dernier apparaît comme primordial dans le développement des télécommunications et de la mobilité, comme en témoignent par exemple les efforts américains liés à la localisation des appels d'urgence passés par le 911. L'Europe met également en place un tel système par le 112, qui nécessite des développements, en particulier en localisation en zones de non-couverture des systèmes de navigation par satellites (Global Navigation Satellite Systems – GNSS – comme le GPS américain ou le système russe GLONASS). Ce dernier point fait l'objet d'une thématique spécifique dans le programme de la future constellation européenne GALILEO. La définition d'un moyen "universel" de localisation intégrable aux systèmes actuels de "communication mobile" constitue ainsi le défi des prochaines années. Les diverses techniques proposées actuellement présentent toutes des limitations importantes, en termes de couverture ou de précision.*

**P**renons par exemple le cas de la fonction "navigation", permettant de fournir la capacité à proposer une application de guidage, et comparons deux techniques de localisation parmi les plus employées : l'identification de cellule (Cell-Id) dans le cas des réseaux de téléphonie mobile et la triangulation dans le cas des GNSS. Le tableau 1 résume la situation.

Il apparaît que la fonction en question n'est en fait réalisable avec aucune des deux techniques, pour des raisons différentes. Cela est effectivement le cas si l'on cherche à fournir un "service" de guidage à un piéton. Dans le cas de l'auto-

Technique de localisation	Cell-Id	GNSS
Intérieur	OUI	NON
Extérieur	OUI	OUI
Fonction Navigation	NON	OUI
Continuité de service	NON	NON

Tableau 1 : Cas particulier de la fonction "navigation".

mobile, les contraintes de fonctionnement sont plus restrictives (milieu extérieur principalement, pas de problème d'énergie, attitude constante du terminal – le véhicule –, etc.), menant à un fonctionnement globalement satisfaisant avec une technique GNSS (tout de même "augmentée" par la possibilité de coupler le positionnement avec des capteurs inertiels et une cartographie routière). Il apparaît ainsi que la localisation, brique élémentaire pour toutes les applications liées à la navigation, aux services géolocalisés ou réclamant l'utilisation de la donnée de position, devrait en fait :

- Être disponible dans des environnements très variés (zones rurales, zones urbaines, intérieur, etc.).
- Fournir une précision qui dépend assurément du contexte et de l'application envisagée.
- Permettre la gestion de la "continuité de service".

Les spécifications de cette localisation sont ainsi très différentes suivant les applications. De plus, aucune technique, dans l'état actuel des développements, ne permet réellement de couvrir de façon satisfaisante un ensemble large de besoins. Pour illustrer cette complexité sous-jacente, les tableaux 2 et 3 sont une première approche de classement, par grands domaines d'applications (tableau 2) et par lieux de mise en œuvre (tableau 3).

Ces tableaux reflètent la diversité des situations potentielles ainsi que l'étendue des besoins techniques. Il est également important de comprendre que ceci n'est en réalité qu'une petite partie de la diversité réelle. Prenons par exemple le cas des aéroports : suivant que la localisation s'adresse aux responsables de la gestion quotidienne du lieu (avions, véhicules d'intervention, logistique, personnels...) ou aux usagers en déplacement dans l'aérogare, les besoins sont fondamentalement différents en termes de cou-

DOMAINES	PRECISION	INTERIEUR	EXTERIEUR
Assistance	≈ 100 m	Pas obligatoire	Indispensable
Confort	< 100 m	Pas obligatoire	Utile
Déplacements	1 m à 100 m	Utile	Indispensable
Jeux	1 m à 100 m	Pas obligatoire	Utile
Santé	1 m à 100 m	Important	Important
Services	1 m à 100 m	Utile	Indispensable
Tourisme	1 m à 100 m	Utile	Utile
Transports	1 m à 10 m	Important	Indispensable
Urgences	1 m	Indispensable	Indispensable

Tableau 2 : Premier classement par "domaines".

LIEUX	PRECISION	INTERIEUR	EXTERIEUR
<b>Aéroport Gare</b>	environ 10 m	Indispensable	Indispensable
<b>Campagne Montagne</b>	< 100 m	Pas obligatoire	Utile
<b>Centre Commercial</b>	< quelques m	Indispensable	Pas obligatoire
<b>Centre de Conférence</b>	< quelques m	Indispensable	Pas obligatoire
<b>Entrepôt</b>	environ 1 m	Indispensable	Utile
<b>Mer / Port</b>	1 m à 100 m	Indispensable	Indispensable
<b>Musée</b>	< quelques m	Utile	Indispensable
<b>Parc d'attraction</b>	environ 10 m	Utile	Utile
<b>Route</b>	environ 10 m	Utile	Indispensable
<b>Rue</b>	environ 10 m	Utile	Indispensable
<b>Zone de stockage</b>	< 10 m	Pas obligatoire	Indispensable

**Tableau 3 : Premier classement par "lieux de déploiement"**

verture, de milieux de fonctionnement, de précision, de disponibilité, de garantie de fonctionnement, etc. Il est en fait possible de dresser de telles différences sur pratiquement toutes les lignes des tableaux précédents. Ceci constitue sans doute l'une des raisons de l'étrécissement actuel des services proposés : cette remarque est en particulier applicable au grand public.

## Les applications de la localisation

Faisant suite à ce constat, il est tout de même important de faire un point sur l'ensemble des applications et domaines dans lesquels les systèmes de localisation sont la source d'améliorations, d'optimisation ou encore d'usages nouveaux. Bien que des systèmes spécifiques existent depuis de nombreuses années, c'est avec le système GPS américain, ayant une couverture mondiale et également spatiale, que les applications se sont développées. Ce système, gratuit d'utilisation (pour la partie permettant un positionnement typique à quelques mètres dans des conditions de réception des signaux satisfaisantes), a été historiquement développé pour des besoins militaires, dans les domaines maritimes, aériens et terrestres. Ce dernier cas est toutefois plus contraignant pour la réception des signaux, surtout s'il s'agit de détecter ceux-ci dans une zone urbaine où les bâtiments sont autant de masques potentiels des signaux (de très faible puissance).

Les premières applications civiles ont donc été naturellement orientées vers le domaine maritime, puis le monde des transports de façon plus large, qui constitue selon les prévisions l'un des deux grands secteurs des futurs revenus liés à la localisation, avec les télécommunications. Les applications couramment citées sont résumées par domaine ci-après.

### Les transports routiers :

- la navigation routière,
- la gestion du trafic,

- la gestion de flottes de véhicules,
- le guidage de véhicules d'urgence et de secours,
- l'optimisation des transports publics,
- le développement des "ITS" (systèmes de transport intelligents),
- le péage "à la carte", etc.

### Les transports ferroviaires :

- le contrôle des trains et la gestion du trafic,
- le suivi des marchandises,
- l'information aux passagers,
- l'optimisation de l'énergie utilisée,
- l'entretien des voies, etc.

### Les transports aériens :

- la gestion du trafic aérien,
- la simplification de certaines phases de vol, etc.

Les services "géolocalisés", ou "Location Based Services" (LBS) représentent le deuxième grand débouché. Ces services sont à la convergence de trois mondes : les télécommunications, la localisation et les contenus. Les progrès réalisés ces dernières années dans ces trois disciplines sont considérables et permettent d'envisager ces services à moyen terme. Ils se proposent, entre autres, de fournir :

- des services d'information et de navigation,
- des services d'assistance d'urgence (E 112),
- un suivi de biens ou de personnes,
- une optimisation des réseaux.

Bien sûr, d'autres domaines sont également concernés par l'essor de systèmes de positionnement, comme par exemple l'énergie, les travaux publics, la protection civile, la finance, les assurances, une référence de temps (apport très significatif des GNSS dans ce secteur), l'agriculture, la pêche, l'environnement, les loisirs, etc.

La tendance actuelle est orientée vers des systèmes mobiles, capables de détecter et de s'immerger dans leur environnement de façon transparente à l'utilisateur afin d'optimiser les ressources en particulier. Il est très probable que la connaissance, d'une façon ou d'une autre, de la position absolue ou relative, contextuelle et géoréférencée des personnes et des biens est un atout important dans le développement des systèmes futurs. En ce sens, la dynamique engendrée par le programme GALILEO est bénéfique.

## Les techniques et technologies disponibles

La communauté scientifique et industrielle semble considérer qu'il est tout à fait important de fournir une continuité à la fonction de localisation, en fonction des divers environnements susceptibles d'être rencontrés par les personnes ou les biens, et a développé quelques techniques pour y parvenir. Il est possible de citer par exemple :

- Les réseaux de capteurs.
- Les réseaux locaux sans fil (WLAN).
- Les réseaux mobiles de télécommunications (GSM, UMTS).
- Les constellations de satellites de navigation, comme le GPS ou le futur Galileo.

- Les systèmes additionnels, de type capteurs inertiels.

Les réseaux de capteurs sont clairement une approche dont les performances peuvent être excellentes mais pour lesquels l'infrastructure représente une très forte contrainte : la mise en œuvre de ces derniers est du domaine des applications de "niches". Les techniques employées sont nombreuses : ultrasons, infrarouge, capteurs de pressions ou encore étiquettes électroniques.

L'idée répandue consiste à considérer que les techniques utilisant les réseaux de télécommunication mobiles (GSM ou UMTS), ou locaux (Bluetooth, Wi-Fi ou Ultra Wide Band UWB), sont à classer dans la catégorie des systèmes "sans infrastructure" puisque cette dernière est déployée par ailleurs, pour des besoins sans lien avec la localisation. Ceci est partiellement inexact compte tenu du fait qu'il est en général nécessaire de mettre en œuvre des moyens spécifiques à la localisation (sauf, il est vrai, pour l'identification de la cellule, le "Cell-Id", qui n'est cependant pas satisfaisant en termes de précision). Ces réseaux ne permettent pas d'obtenir de bonnes précisions sans un déploiement très important et ne constituent finalement pas une alternative de qualité suffisante.

Le positionnement en milieux difficiles, et en intérieur en particulier, constitue une limitation actuelle forte des systèmes de localisation globaux de type GNSS. De nombreuses solutions tendent à voir le jour, poussées par les industriels du secteur, comme par exemple l'Assisted-GNSS (A-GPS) ou encore les HSGNSS (pour "High Sensitivity GNSS").

Les améliorations en termes de capacité à fournir une position dans des environnements auparavant non couverts par les satellites sont réelles. Cependant, il apparaît aujourd'hui de nouvelles limitations : la limite de détection n'est toujours pas suffisante pour permettre le "deep indoor" (le positionnement en intérieur profond), la précision obtenue est dégradée par rapport à l'extérieur, alors qu'il faudrait l'améliorer légèrement, et enfin le temps nécessaire à l'obtention d'une position est parfois de plusieurs secondes. Ces solutions, développées dans le domaine des systèmes de navigation par satellites, ne réclament pas d'avoir recours à une infrastructure : cependant, ici encore, ces approches ne semblent pas permettre une continuité de la fonction de localisation dans des conditions satisfaisantes. Le constat est ainsi le suivant : une solution sans infrastructure spécifique, idéale dans l'absolu, n'a pas encore pu être mise en œuvre dans de bonnes conditions, malgré les efforts importants menés par les industriels des télécommunications et de la navigation.

Les systèmes inertiels sont eux aussi à classer dans la catégorie des "sans infrastructure" : le terminal mobile est alors complexe et les modélisations nécessaires au bon fonctionnement non triviales. Cette solution semble viable pour des applications de niches (malvoyants par exemple), compte tenu du coût élevé du terminal et des très bonnes performances possibles. Une classification grossière des différents systèmes de localisation (voir tableau 4) permet de mieux comprendre les choix actuels dans le domaine de la continuité de la fonction de localisation.

	Pos	Préc	Disp	Infra	Ter	S
<b>Réseaux de capteurs</b>	R	+++	++	---	+	+3
<b>WLAN</b>	A	+	++	--	+	+2
<b>Réseaux mobiles</b>	A	--	+	++	+	+2
	A	-	+	++	+	+3
<b>Navigation par satellites</b>	A	++	+	++	++	+7
<b>Systèmes inertiels</b>	R	+	++	+++	-	+5
	R	+	+++	+++	-	+6

**Tableau 4 : Classification grossière des techniques.**

Chaque système du tableau est caractérisé par 2 lignes : la ligne supérieure caractérise le positionnement en intérieur alors que la ligne inférieure caractérise le positionnement en extérieur.

Les diverses colonnes permettent de classer les technologies en termes de :

- Pos : type de positionnement (R pour relatif, A pour absolu)
- Préc : la précision de positionnement
- Disp : la disponibilité des signaux
- Infra : la complexité de l'infrastructure nécessaire
- Ter : la complexité du terminal mobile

Ce tableau permet d'apprécier les performances respectives des solutions potentielles. Les approches actuelles cherchant à permettre une localisation en tous lieux sont de deux natures.

- Celles qui visent à rendre interoperables plusieurs systèmes afin d'y parvenir : par exemple GPS et WLAN ou encore GPS et systèmes inertiels, comme pour le PNS ("Pedestrian Navigation System" de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne).
- Celles qui tentent d'améliorer une technologie afin de la rendre plus versatile : GSM / UMTS ou GNSS avec des récepteurs de haute sensibilité.

L'avantage de l'utilisation d'un récepteur de navigation par satellites pour réaliser la fonction de localisation en zone de non-ouverture des signaux GNSS réside dans le fait qu'il est alors possible de parler de système de positionnement "universel", fonctionnant dans tous les environnements et n'utilisant qu'un seul moyen technique. Ces approches sont une alternative à tout ce qui vient d'être présenté et qui consiste à imaginer une infrastructure, la plus légère possible, qui permettrait à un récepteur GNSS de fournir une position, par exemple en intérieur. Deux approches sont décrites dans la littérature scientifique : les pseudolites (pour "pseudo-satellites") et les "répéteurs" GNSS.

En conclusion, dressons un nouveau tableau (tableau 5), regroupant les performances des diverses techniques et technologies possibles (non exhaustif). Il serait encore possible d'éclater ce tableau en sous-catégories afin de montrer qu'il est indispensable de faire le parallèle avec d'autres paramètres fondamentaux comme la couverture ou les complexités respectives (et les coûts) des infrastructures, à déployer ou à développer, et des terminaux.

TECHNIQUES	INTERIEUR	EXTERIEUR
Réseaux de Capteurs	1 cm à 5 m	<b>Non Adapté</b>
RF ID	< 1 m	< 1 m
WLAN	quelques m	Non Adapté
UWB	environ 10 cm	Non Adapté
Cell-Id	500 m à 10 km	100 m à 10 km
E-OTD (2G) TDOA (3G)	> 200 m	< 100 m
GNSS	Non Disponible	environ 5 m ↘
A-GNSS	10 m ↔ Non Disponible	environ 5 m ↘
Pseudolites	environ 10 cm	environ 5 m ↘
Répéteurs	environ 1 à 2 m	environ 5 m ↘
Inertiel	< 1 m (si recalage)	< 1 m (si recalage)

Tableau 5 : Premier classement par "techniques".

## Les techniques GNSS en intérieur à base de répéteurs

Le principe de base d'un répéteur est de rendre les signaux GPS disponibles à l'intérieur par le biais d'une amplification de ces derniers. En effet, la principale constatation sur le non-fonctionnement d'un récepteur GPS en intérieur repose sur le très faible niveau des signaux, rendant la détection très délicate. La solution décrite dans ce document utilise des répéteurs qui transmettent l'ensemble des signaux reçus sur une antenne extérieure, où la réception est de très bonne qualité (sur le toit du bâtiment par exemple), vers l'intérieur. Le schéma de principe du système déployé est exposé figure 1 (sans la machine à cycler).

Il apparaît assez clairement que l'utilisation de répéteurs conduit à une difficulté lorsqu'il faut résoudre les équations de navigation avec un récepteur actuel. En effet, le chemin de propagation est artificiellement "courbé" lors de son passage dans le répéteur. Ainsi, les temps de propagation réellement mesurés par le récepteur, fournissant les pseudo-distances, ne donnent pas la distance euclidienne séparant les satellites du récepteur intérieur, mais en fait une somme de distances : celle séparant le satellite de l'antenne de réception sur le toit du bâtiment, plus celle correspondant à la propagation entre l'antenne de retransmission en intérieur et l'antenne du récepteur intérieur. A ceci, il convient de plus d'ajouter les délais électroniques dus au système déployé (amplificateurs, coupleurs, etc.). Il est ainsi nécessaire, pour déterminer une position en intérieur, de définir une architecture matérielle du système ainsi que des algorithmes de traitement des signaux reçus afin de prendre en compte la présence des répéteurs. Notre approche technique se porte sur les données brutes, et en particulier sur les pseudo-distances : le raisonnement suivi est exposé dans la suite de ce document.

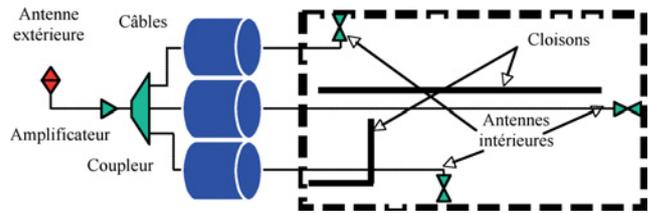


Figure 1. Schéma de principe du système déployé.

On récupère les signaux de l'antenne extérieure qui sont transmis par câble vers un appareil à cycler. L'appareil transmet, toujours par câble, ces signaux au répéteur 1 pendant un intervalle de temps  $\Delta t$  défini par l'expérimentateur. A la fin de ce temps, l'appareil à cycler cesse de transmettre les signaux au répéteur 1 et commence à transmettre au répéteur 2 pendant la même durée  $\Delta t$ . La même opération recommence avec le répéteur 3 puis à nouveau avec le répéteur 1 et on recommence, d'où l'expression de "cycle" qui a donc une durée de  $3\Delta t$  dans l'exemple considéré ici (qui permet un positionnement en deux dimensions). Il est bien sûr possible d'avoir davantage de répéteurs : en particulier, quatre sont nécessaires pour un positionnement en trois dimensions.

Lorsque le répéteur  $i$  émet, la distance entre le répéteur et la position à mesurer est  $d_i$ . Le récepteur GPS mesure les pseudo-distances des satellites, où une mesure de pseudo-distance dans ces conditions correspond à :

$$PR_{\text{mesurée}} = d_{\text{Sat-AntExt}} + c \times T_{\text{Prop-Elec}} + d_i + c \times \Delta t_u$$

Dans laquelle

- $d_{\text{Sat-AntExt}}$  représente la distance entre le satellite et l'antenne de réception extérieure,
- $T_{\text{Prop-Elec}}$  représente le temps de propagation dû au système électronique, en particulier les amplificateurs et câbles,
- $\Delta t_u$  représente classiquement le biais d'horloge.

Nous cherchons à extraire  $d_i$  de ces mesures, mais c'est assez délicat car nous n'avons aucun moyen de déterminer de façon précise les autres éléments de l'équation. C'est pourquoi nous cherchons plutôt à mesurer la variation de la distance  $d_i$  lorsque l'on change de répéteur, par exemple pour le passage du répéteur 1 au répéteur 2.

$$\begin{aligned} PR_{\text{mesurée}}(1) &= d_{\text{Sat-AntExt}} + c \times T_{\text{Prop-Elec}}(1) + d_1 + c \times \Delta t_u(t) \\ PR_{\text{mesurée}}(2) &= d_{\text{Sat-AntExt}} + c \times T_{\text{Prop-Elec}}(2) + d_2 + c \times \Delta t_u(t+\Delta t) \end{aligned}$$

La calibration de l'électronique apparaît ainsi clairement comme un élément important. Cependant, nous allons surtout faire des différences et toutes les valeurs communes à tous les répéteurs seront éliminées : subsistent les valeurs différentielles. Dans le cas présent, seuls les câbles et quelques amplificateurs sont différents d'un répéteur à l'autre. Le délai différentiel induit par les amplificateurs est ainsi tout à fait négligeable et les câbles sont identiques et ont une longueur de 100 mètres. La validité des résultats obtenus semble justifier cette hypothèse. Il est cependant évident que dans un cas réel de déploiement, ceci doit être pris en compte. En ne considérant donc aucun délai différentiel dans la structure, la différence conduit à :

$$PR_{\text{mesurée}}(2) - PR_{\text{mesurée}}(1) = d_2 - d_1 + c \times \Delta t_u(t+\Delta t) - c \times \Delta t_u(t)$$

Comme de plus  $d_2 = d_1 + \Delta 12$ , il vient :

$$PR_{\text{mesurée}}(2) - PR_{\text{mesurée}}(1) = \Delta 12 + c \times \Delta t_u(t+\Delta t) - c \times \Delta t_u(t)$$

Théoriquement on devrait pouvoir accéder de cette façon à  $\Delta 12$ , mais en pratique on préfère utiliser les variations de la mesure de pseudo-distance et repérer ensuite lors du passage d'un répéteur au suivant la variation de cette variation (qui correspond donc à une accélération). Cette méthode a plusieurs avantages dont celui de pouvoir négliger la variation du biais d'horloge, source importante d'imprécision, en jouant sur la fréquence de mesures. Si l'intervalle de temps séparant deux mesures successives est suffisamment faible, la variation du biais d'horloge, c'est-à-dire la dérive du biais d'horloge, peut être considérée comme constante sur une faible durée. Soit  $\Delta t_m$  le temps entre deux mesures et si on suppose que la mesure 1 est faite à l'instant  $tt$  juste avant la transition de  $i$  vers  $j$  et la mesure 2 juste après, il est possible d'écrire l'équation des variations de mesures de pseudo-distances comme suit :

$$\Delta(PR_{\text{mesurée}}(tt+\Delta t_m) - PR_{\text{mesurée}}(tt)) = \Delta(\Delta_{ij}) + c \times \Delta(\Delta t_u(tt+\Delta t_m)) - c \times \Delta(\Delta t_u(tt))$$

Ceci peut également s'exprimer en termes d'accélération, comme suit :

$$\Delta(PR_{\text{mesurée}}(tt+\Delta t_m) - PR_{\text{mesurée}}(tt)) / \Delta t_m = \Delta(\Delta_{ij}) / \Delta t_m + c \times (\Delta(\Delta t_u(tt+\Delta t_m)) - \Delta(\Delta t_u(tt))) / \Delta t_m$$

Si  $\Delta t_m$  est assez petit, on peut négliger l'accélération du biais d'horloge qui est naturellement faible. Sans forcément diminuer  $\Delta t_m$  à l'extrême, ce qui peut poser certains problèmes de bruit de mesure et se trouver limité par les performances du récepteur, on peut déjà extraire l'accélération à la transition " $\Delta(\Delta_{ij}) / \Delta t_m$ " et ensuite remonter par intégration (qui se résume ici à une multiplication) à  $\Delta_{ij}$  que nous cherchons. En résumé, nous observons ainsi les variations de pseudo-distances entre deux instants successifs de mesure relativement proches (dans les exemples suivants nous retiendrons 200 ms, ce qui correspond à un taux de mesures brutes de 5Hz), ces instants étant précisément ceux correspondant à la transition d'émission entre deux répéteurs.

Avec deux mesures de ce type, on est alors capable de calculer une position en 2 dimensions (en utilisant par exemple l'algorithme des moindres carrés classique utilisé par le GPS). Trois répéteurs sont nécessaires pour obtenir deux valeurs de transitions, quatre seraient nécessaires pour obtenir trois transitions afin de calculer une position en trois dimensions. On peut voir ci-dessous une courbe typique (figure 2). Le dispositif de cyclage était réglé sur  $\Delta t = 10$  secondes, soit un cycle complet de 30 secondes. On observe bien le cycle se répétant toutes les 30 secondes avec des variations brutales toutes les 10 secondes correspondant aux moments des transitions. Les variations sont positives ou négatives selon que la distance augmente ou diminue d'un répéteur au suivant. La fréquence de mesure est de 5 Hz soit  $\Delta t_m = 0,2$  s, valeur typique de travail. C'est pourquoi la variation de pseudo-distance visible en ordonnée est exprimée en 1/5 m/s, il faut multiplier par 5 pour retrouver la vitesse de variation de la pseudo-distance.

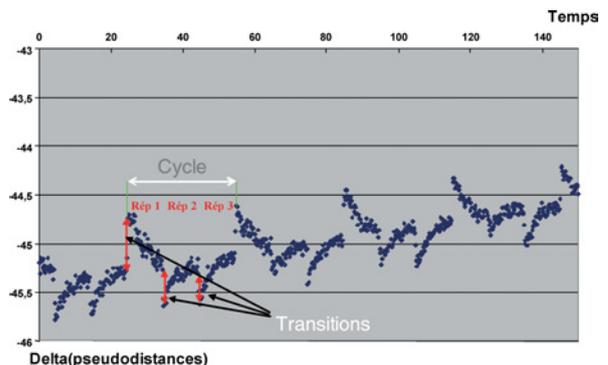


Figure 2. Courbe de résultats bruts typique.

Rappelons que nous nous intéressons pour le moment à un récepteur autonome L1 utilisant le code C/A, et que la précision de positionnement visée est de quelques mètres. Si possible, les milieux intérieurs étant de taille plus restreinte que l'extérieur, nous tenterons de faire un peu mieux : l'objectif avoué se situe ainsi dans la gamme des 1 à 3 mètres.

## Les performances de positionnement obtenus

Dans un premier temps, les trois répéteurs sont placés dans la même salle de réunion : la précision obtenue est de très bonne qualité, dans la gamme escomptée de 1 à 2 mètres. Les points calculés sont obtenus pour un ensemble de 9 cycles consécutifs (dans le cas présent représentant 9x10 secondes d'enregistrement), et pour une moyenne sur 6 satellites. Il est à noter qu'aucun choix n'est pour le moment fait sur les satellites ou les cycles : les premiers qui sont disponibles dans le fichier de résultats sont retenus. En général, de 8 à 11 satellites sont disponibles pour faire le calcul de position. Ces résultats sont intéressants lorsque l'on garde en mémoire la simplicité de déploiement de l'infrastructure ainsi que celle de traitements réalisés par le récepteur.

La question suivante est de connaître l'effet de la traversée d'une cloison sur les résultats ci-dessus. En effet, il est possible de considérer que seuls quelques trajets multiples sont susceptibles de provoquer des troubles dans les mesures dans un environnement similaire à celui d'une grande salle. Nous avons décidé d'avancer pas à pas, et ainsi de ne déplacer que le répéteur 1 et de le positionner dans la pièce adjacente (elle aussi de très grande dimension). Aucune différence notable n'est observable, excepté pour un point proche du répéteur 3 pour lequel la précision se dégrade à environ 1,2 mètre. Dans tous les cas, ceci montre encore une fois d'excellentes valeurs de précision, sachant que nous parlons ici de précision réelle, c'est-à-dire entre le point calculé et le vrai point de mesure. Il est à noter que des structures métalliques incorporées dans les murs de séparation entre les deux salles de réunion sont présentes, qu'il s'agisse de gaines techniques, de plinthes métalliques ou encore de descentes de câbles électriques (l'alimentation principale arrive par les faux plafonds et les prises sont implantées "normalement", au sol).

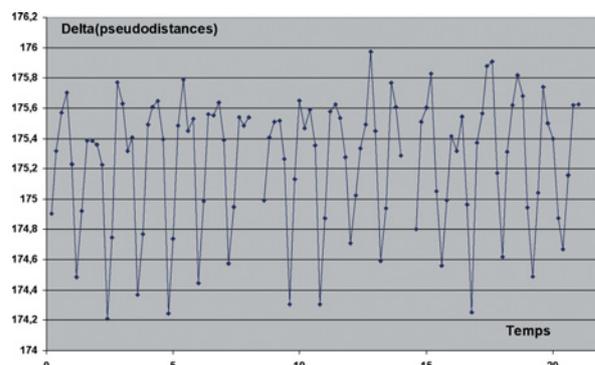
Afin de pousser plus avant les données expérimentales, nous avons alors décidé de faire quelques tests à l'étage inférieur.

Seuls trois points ont été réalisés afin de conserver le même jeu qu'à l'étage supérieur (les autres points se trouvent dans les murs). La légère mais notable dégradation de la précision, est principalement due au caractère plus bruité des courbes montrant les transitions (et de fait une détermination des transitions de moins bonne qualité). Il est intéressant de remarquer qu'en général, lorsque l'on descend d'un étage, les distances ne s'accroissent pas (au contraire), mais les structures à traverser, pour les ondes radio, sont sensiblement plus consistantes. Il s'agit en effet de chapes, souvent en béton armé dans des bâtiments collectifs, et sur lesquelles un ensemble de servitudes est déployé: rails techniques de passage de câbles, faux plafonds, éclairages de tous types, etc. Nous n'avons pas mené de mesures spécifiques sur les multi-trajets, et il est bien évident que de telles perturbations existent. Force est de constater que les résultats ne traduisent pas un impact rédhibitoire pour la méthode employée. Précisons également que pour les raisons de rebouclage potentiel déjà évoquées dans ce document, nous n'avons pas modifié la puissance du signal émis, qui demeure à environ  $-60\text{dBm}$ .

Il y a un point qui n'a pas encore été abordé, et qui est tout à fait primordial dans le cadre d'un système réel: le temps nécessaire au cyclage afin de calculer une position. La très grande majorité des expériences a été menée avec un temps passé sur chaque répéteur de 10 secondes, ce qui implique un rafraîchissement de la position toutes les 30 secondes. Bien évidemment, le fait de rester statique durant près de 30 secondes pour permettre au récepteur de faire un point est tout à fait irréaliste dans un cas réel. De plus, la notion de continuité de service de localisation, un des objectifs de nos travaux, s'en trouverait alors fort mise à mal.

Les quelques expériences réalisées dans la suite ont eu pour but de définir le comportement des répéteurs et du récepteur lorsque ce temps de cyclage était progressivement réduit à 5, puis 2, puis 1 et enfin 0,4 seconde. Il faut relier ce dernier temps de 400 ms au taux de fonctionnement du récepteur, qui est ici de 5 Hz: cela signifie que le récepteur fait 2 points pour chaque répéteur (le cyclage est en effet alors à 2,5Hz). Bien que les meilleurs résultats aient été réalisés avec un temps de 2 secondes sur chaque répéteur, ceci n'est ici encore pas significatif: nous restons dans le cercle de 1 mètre de rayon, avec le cyclage à 2,5 Hz également. Ces résultats sont là encore très encourageants par rapport aux approches proposées: il n'y a pas de difficulté majeure qui émerge de l'ensemble des travaux menés, même si le développement nécessaire est encore important. Cependant, si les résultats de positions finales sont très proches, les formes des courbes de pseudodistances diffèrent beaucoup en fonction du temps de cyclage. Pour illustrer ceci, la figure 3 ci-dessous montre une courbe typique obtenue dans le cadre d'un cyclage à 2,5 Hz.

Rappelons que le récepteur fait alors un maximum de 2 points par répéteur. On constate en effet que nous ne voyons plus apparaître les pics de façon aussi claire que pour des cyclages longs, bien qu'une observation fine de cette dernière courbe montre bien, si on groupe les points par deux, un fonctionne-



**Figure 3. Influence du temps de cyclage sur la courbe typique des données brutes.**

ment conforme aux attentes: un pic important vers le bas suivi d'un pic d'amplitude comparable vers le haut (première transition du répéteur 2 vers le répéteur 3 et deuxième du répéteur 3 vers le 1), puis enfin une variation quasi inexistante (le point est à peu près à égale distance des répéteurs 1 et 2). Faisons un commentaire sur la cohérence de l'approche à base de répéteurs, en fonction de ces résultats: le temps de cyclage atteint correspond à un rafraîchissement de la position à un taux de 1 Hz environ, c'est à dire comparable à ce qu'un récepteur en extérieur est capable de fournir actuellement. Mais surtout, dans l'optique de réaliser du positionnement dynamique, ce qui est clairement la prochaine étape, il faut mettre ce taux en relation avec la vitesse de déplacement du piéton, d'environ 1 m/s, ainsi qu'avec la précision de positionnement obtenu, typiquement d'un mètre. Cela concorde de façon très satisfaisante: 1 Hz, 1 m/s et 1 m de précision!

Les méthodes de calcul de position à partir des valeurs des transitions est tout à fait similaire à ce qui se passe dans un récepteur GPS actuel. Nous avons mis en œuvre la méthode classique de linéarisation des équations de navigation. D'autres méthodes permettraient cependant d'améliorer la méthode, en particulier pour le calcul en 3-D. Notons enfin que ce dernier calcul en 3-D, nécessitant la mise en œuvre de quatre répéteurs, fourni également une précision de l'ordre d'un mètre tant en horizontal qu'en vertical. Pour atteindre ce résultat, en particulier pour la composante verticale, il est nécessaire d'avoir recours à un déploiement optimisant les valeurs de Dilution de Précision (DOP) horizontale et verticale. Pour cette dernière, il est ainsi utile de positionner un répéteur sous le récepteur, en particulier à l'étage inférieur lorsque cela est possible. Notons que ceci n'est pas possible dans le cas de la constellation GPS en extérieur, pour laquelle l'ensemble des satellites visibles se trouvent au dessus de l'horizon (pour un récepteur placé sur terre), ce qui limite la DOP verticale.

## Perspectives avec les futurs signaux GNSS modernisés (GPS et GLONASS)

Dans ce chapitre, nous allons décrire la façon d'utiliser les capacités multi-fréquences des constellations actuelles (ou disponibles dans un très proche futur, comme par exemple la

seconde fréquence civile L2C de GPS et GLONASS). Le cas de Galileo est traité dans le chapitre suivant.

Au lieu de conserver une unique fréquence L1, puis de procéder au cyclage déjà décrit, nous allons maintenant émettre sur chaque répéteur un signal différent. Ceci nous rapproche du mode de fonctionnement des "pseudolites", mais nous allons conserver l'originalité de l'approche à base de répéteurs en transmettant non pas le signal d'un satellite (ou d'un ensemble de satellites) sur un répéteur donné, mais l'ensemble des signaux reçus sur une fréquence donnée, pour une constellation donnée. Ceci peut ainsi être, par exemple, la combinaison de départ suivante (cas de l'utilisation des constellations GPS et GLONASS et de quatre répéteurs - voir figure 4) :

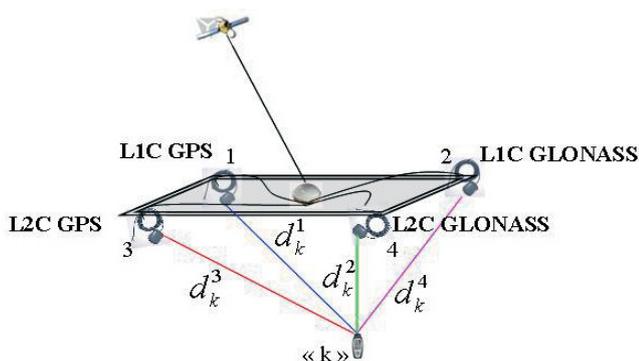
Répéteur n°1 : Signaux GPS-L1

Répéteur n°2 : Signaux GLONASS- L1

Répéteur n°3 : Signaux GPS- L2

Répéteur n°4 : Signaux GLONASS- L2

Avec deux mesures, on est alors capable de calculer une position en 2 dimensions (en utilisant par exemple l'algorithme de linéarisation classique utilisé par le GPS). Trois répéteurs sont nécessaires pour obtenir deux valeurs de transitions, quatre seraient nécessaires pour obtenir trois transitions afin de calculer une position en trois dimensions. Le schéma de principe du système déployé est exposé figure 4. Nous rappelons que l'objectif est de fournir une précision de positionnement typique identique à celle qu'il est possible d'obtenir aujourd'hui à l'extérieur, afin de permettre une gestion simplifiée de la continuité de la fonction "localisation". Nous faisons ici état de signaux de modernisation des constellations qui se proposent de fournir des fréquences "civiles" sur L2 également (L2C). Bien sûr, l'extrapolation à tous les types de signaux est possible, et en particulier à ceux qui seront disponibles de la constellation Galileo, comme nous allons le voir dans la suite. Il est important également de signaler que l'intérêt primordial du cyclage repose sur la minimalisation des erreurs de pseudo distances. En effet, le fait d'utiliser le système sans prendre en compte le cyclage est tout à fait possible et entraîne alors des erreurs identiques à celles observables en extérieur sur des systèmes de réception autonomes. Le cyclage permet, comme cela est décrit dans la première partie de ce chapitre, de réali-



**Figure 4. Principe de la retransmission multi-porteuse indoor dans le cas de GPS et GLONASS.**

	t1	t2	t3	t4	t'1
Répéteur n°1	L1 GPS	L1 GLO	L2 GPS	L2 GLO	...
Répéteur n°2	L1 GLO	L2 GPS	L2 GLO	L1 GPS	...
Répéteur n°3	L2 GPS	L2 GLO	L1 GPS	L1 GLO	...
Répéteur n°4	L2 GLO	L1 GPS	L1 GLO	L2 GPS	...

**Tableau 5 : Exemple de cyclage multi constellation et multi fréquence.**

ser un calcul différentiel temporel, ce qui réduit les erreurs à des erreurs différentielles à très court terme (typiquement inférieur à la seconde). Le principe repose donc sur l'utilisation combinée de trois concepts : le multi-constellation, le multi-fréquence et le cyclage. Ces trois concepts peuvent être représentés schématiquement par l'intermédiaire du tableau 3 suivant, présentant un cyclage complet de quatre répéteurs (pour un positionnement en 3D), reprenant le cas d'exemple des signaux GPS et GLONASS sur L1 et L2.

Dans une telle configuration, il est alors possible d'obtenir les variations de distances, lors d'une transition d'un répéteur vers le suivant, des quatre répéteurs. Le calcul de position est ainsi possible à chaque transition. Afin d'illustrer le concept, regardons ce qui se passe à la transition entre t1 et t2 (c'est-à-dire en considérant deux instants très proches, l'un juste avant t2 et le second juste après). En désignant par  $d_i$  la distance entre le répéteur "i" et le récepteur intérieur, nous obtenons :

- $d_2-d_1$  par l'intermédiaire de L1 GLONASS,
- $d_3-d_2$  par l'intermédiaire de L2 GPS,
- $d_4-d_3$  par l'intermédiaire de L2 GLONASS,
- $d_1-d_4$  par l'intermédiaire de L1 GPS.

Cette approche nous permet donc, en utilisant plusieurs constellations et plusieurs fréquences dans le but de ne pas créer d'interférence entre les signaux, tout en conservant un mode de retransmission ne nécessitant aucun traitement complexe (de type séparation de canaux), de calculer un point en 3D à chaque transition avec une précision "différentielle" (typiquement de l'ordre du mètre).

## Perspectives avec les futurs signaux Galileo

Il est également possible de décrire le concept dans le cadre de la future constellation Galileo, avec un intérêt encore plus marqué. Considérons le schéma de la figure 8. Dans ce cas, il apparaît que nous utilisons quatre signaux (L1, E5a, E5b et E6) issus d'un même satellite, afin de reconstituer une constellation artificielle locale. Dans un tel cas, l'écriture du système d'équations de navigation à une forme identique à celui du GPS actuel par exemple.

Le système d'équation est donné à titre indicatif ci-après dans lequel les grandeurs sont identiques à celles utilisées dans le chapitre précédent. Ce système peut également s'écrire sous la forme classique suivante (x, y et z sont les coordonnées du point intérieur cherché, xi, yi et zi celles des répéteurs – associés à la fréquence d'émission "i" – dans un référentiel local,

et regroupant les dérivées des horloges du satellite et du récepteur,  $P_{k,i}^j$  la pseudo-distance mesurée sur le récepteur intérieur "k" pour le satellite "j" à la fréquence d'émission "i") :

$$\begin{cases} P_{k,E5a}^i(t) = \sqrt{(x-x_a)^2 + (y-y_a)^2 + (z-z_a)^2} + c\Delta T \\ P_{k,E5b}^i(t) = \sqrt{(x-x_b)^2 + (y-y_b)^2 + (z-z_b)^2} + c\Delta T \\ P_{k,L1}^i(t) = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} + c\Delta T \\ P_{k,E6}^i(t) = \sqrt{(x-x_{E6})^2 + (y-y_{E6})^2 + (z-z_{E6})^2} + c\Delta T \end{cases}$$

Une telle approche permet de mettre à profit la diversité des signaux Galileo, et autorise l'obtention d'une position en 3D en intérieur à l'aide d'un seul satellite avec une précision de l'ordre de grandeur de celle possible en extérieur. Il est cependant possible d'aller un peu plus loin, en faisant intervenir le cyclage qui, comme on l'a vu, permet d'améliorer sensiblement la précision de positionnement en introduisant un mode différentiel temporel, réduisant de fait les erreurs à quelques décimètres. La représentation schématique de ceci est donnée figure 6.

Dans cette figure, les répéteurs sont symbolisés par des flèches et la fréquence émise est écrite en bout de flèche. Cette fréquence change à chaque transition, comme le montre la figure (instants  $t_0, t_0+T, t_0+2T$  et  $t_0+3T$ ). Les nouvelles équations de navigation ont maintenant une forme similaire à celle décrite au paragraphe 4, typiques d'un mode de fonctionnement classique des répéteurs. Le principe consiste alors à appliquer la même approche que celle développée succinctement lors du chapitre 4. Ceci permet, par l'intermédiaire du calcul des différences de variation de pseudo-distances entre deux instants consécutifs encadrant une transition, d'améliorer la précision de positionnement, au détriment d'une complexité accrue due au cyclage. Cependant, ici encore, il est alors possible d'obtenir une position en 3D (avec 4 répéteurs), à l'aide d'un seul satellite Galileo, à chaque instant de cyclage.

Il est enfin possible d'imaginer, dans ce dernier cas relatif à Galileo, un fonctionnement très libre : nous avons vu qu'il est possible d'obtenir une continuité de la précision, entre extérieur et intérieur, à l'aide d'un système sans cyclage, et qu'il est également possible d'améliorer la précision en utilisant le cyclage. Un mode mixte est également très simple à mettre

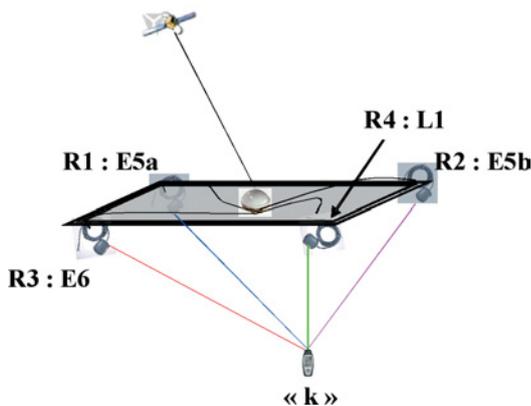


Figure 5 : Principe de la retransmission multi-porteuse indoor dans le cas de Galileo.

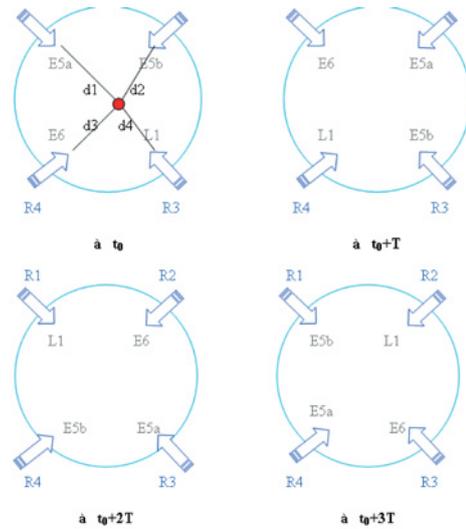


Figure 6 : Ajout du cyclage multi-porteuse indoor (Galileo).

en place : soit le récepteur ne fonctionne qu'en mode "non cyclé", soit il utilise le mode "cyclé" pour faire des points de recalage précis. Il est ainsi possible de concevoir un cycle ayant une période de répétition à la demande, suivant les besoins réels : soit à chaque instant de calcul d'une position (pour un positionnement continuellement précis), soit de loin en loin afin de procéder à des recalages, le récepteur fonctionnant en mode "non cyclé" le reste du temps.

## Conclusion

Les approches à base de répéteurs GPS (ou Galileo) nous semblent une alternative tout à fait intéressante aux systèmes de type Assisted-GPS ou GPS haute sensibilité. Toutes ces techniques présentent l'avantage d'un degré de maturité et de développement bien plus avancé que les techniques répéteurs, mais avec des performances moindres. De là, il nous semble très important de poursuivre dans cette voie afin d'évaluer dans des conditions satisfaisantes cette solution. Ceci d'autant plus que dans certains environnements très "sévères", les autres solutions citées ne permettent pas de trouver une position : les répéteurs seront peut-être la dernière solution possible, tout en conservant un unique récepteur. Les avantages de ce système sont liés principalement aux points suivants :

- La simplicité de l'infrastructure,
- Uniquement des modifications logicielles des récepteurs,
- L'efficacité démontrée de l'approche.

Les premières expériences de validation du concept sont tout à fait satisfaisantes et rien n'indique de véritable difficulté à venir dans les développements futurs. Cependant, il reste beaucoup à faire avant de pouvoir proposer une solution "industrielle". Parmi les questions qu'il reste à analyser, on peut citer :

- Combien faut-il de répéteurs pour couvrir un bâtiment complet typique (centre administratif, musée, centre commercial, palais des expositions, tour de bureaux...)?
- Quel est l'impact sur l'environnement extérieur?
- Comment savoir si on se trouve en intérieur?...

Une autre piste concerne les signaux retransmis : la théorie exposée dans ce document montre clairement que si 3 ou 4 répéteurs sont nécessaires pour un positionnement en 2-D / 3-D, un seul signal peut tout à fait suffire si ce dernier est de bonne qualité. Cette caractéristique ouvre des perspectives intéressantes : par exemple, les signaux d'un satellite géostationnaire pourraient permettre le positionnement par cette méthode (EGNOS – European Geostationary Navigation Overlay System – par exemple). En fait, le récepteur GPS est utilisé ici comme un capteur de signaux de navigation, quels qu'ils soient. De la même façon pourquoi ne pas désigner quelques satellites d'une ou de plusieurs constellations (GPS, Galileo ou même GLONASS) comme "réservés" pour l'intérieur. Un simulateur de signaux pourrait également proposer des constellations volontairement "artificielles" qui permettraient la distinction évidente entre le cas intérieur et le cas extérieur. Ce dernier cas, bien qu'intéressant, nous rapproche en termes de coût des solutions à base de pseudolites et réclame encore quelques réflexions. Enfin, Galileo offre quelques perspectives nouvelles, tant dans l'exploitation des signaux que dans celle du "pilot tone", signal sans données de navigation permettant des performances en acquisition des signaux supérieures à ce qu'autorise le GPS. Cependant, des dires des officiels du programme, les améliorations réalisées ne seront sans doute pas suffisantes pour permettre un fonctionnement en intérieur de qualité suffisante : ceci permet d'envisager quelques perspectives à la technique des répéteurs ...

Nous pensons que la direction la plus prometteuse est l'utilisation combinée de plusieurs constellations et de plusieurs fréquences (afin d'émettre de façon simultanée). En particulier, le cas de Galileo est remarquable car cette constellation propose au moins quatre signaux par satellite, dont trois sont d'accès ouvert (GPS et GLONASS proposeront également une telle configuration au cours de leurs modernisations). A partir de ceci, il est possible d'imaginer une infrastructure à base de répéteurs qui, avec un seul satellite Galileo, autorise le positionnement en intérieur en 3D. Notons que la démonstration partielle d'un tel concept est d'ores et déjà possible avec GIOVE-A (le premier satellite Galileo lancé en décembre 2005 avec succès afin de sécuriser les fréquences et d'expérimenter quelques concepts), sous réserve de disposer d'un récepteur adéquat. De plus, nous pouvons alors envisager deux types de fonctionnement : dans le premier, nous utilisons les répéteurs comme transmetteurs de signaux et obtenons un positionnement identique à ce qui se passe en extérieur. Dans le second, nous mettons en œuvre un cyclage afin de réaliser un positionnement différentiel en temps, et ainsi améliorer la précision (nous pensons qu'il serait alors possible d'obtenir l'ordre du mètre, comme dans le cas des positionnements obtenus avec une infrastructure utilisant des répéteurs). ●

## Contact

Nel SAMAMA

Groupe Navigation - Département Electronique et Physique  
Institut National des Télécommunications  
nel.samama@int-edu.eu

## Références

- [1] Ada Pateli, Kostas Fouskas, Panos Kourouthanassis, Argiris Tsamakos, "On the Potential Use of Mobile Positioning Technologies in Indoor Environments", 15th Bled Electronic Commerce Conference, June 2002, Bled, Slovenia.
- [2] G. Heinrichs, "Personal Localisation & Positioning in the Light of 3G Wireless Communications and Beyond", IFEN, Allemagne, IAIN2003, Berlin, Germany.
- [3] Yohei Takada et AL., "An Information Service System using Bluetooth in an Exhibition Hall", Annales des Telecommunications, Tome 58, N-3-4, pp. 507-530 (2003.3/4).
- [4] Robert J. Fontana, Steven J. Gunderson, "Ultra-WideBand precision asset location system", IEEE Conference on UWB Systems and Technologies, May 2002.
- [5] Frank van Diggelen and Charles Abraham, "Indoor GPS Technology", Global Locate, Inc. [www.gmat.unsw.edu.au/cr/gmat4910/globallocate.pdf](http://www.gmat.unsw.edu.au/cr/gmat4910/globallocate.pdf)
- [6] Changdon Kee, Doohee Yun, Haeyoung Jun, Bradford Parkinson, Sam Pullen, Tom Lagenstein "Centimeter-Accuracy Indoor Navigation Using GPS-Like Pseudolites", [www.tik.ee.ethz.ch/~beutel/projects/picopositioning/gps\\_pseudolites.pdf](http://www.tik.ee.ethz.ch/~beutel/projects/picopositioning/gps_pseudolites.pdf)
- [7] G.I. Jee, J.H. Choi, S.C. Bu, "Indoor Positioning Using TDOA Measurements from Switched GPS Repeater", ION GNSS 2004, September 2004, Long Beach, USA.
- [8] Julien Caratori, Marc François, Nel Samama, Alexandre Vervisch-Picois, "Upgrade RnS Indoor Positioning System in an Office Building", ION GNSS 2004, September 2004, Long Beach, USA.

## ABSTRACT

*With the advent of greater mobility, a heavy need for localization has emerged. This is true not only for automotive applications, but also for personal needs, thus leading to the necessity of having a technical solution to indoor positioning. This latter point appears as of prime importance for telecommunication related applications, as revealed by the United States' efforts concerning the Emergency call E911. The European Union provides such an Emergency Call, the E112, but has decided not to put any legal constraints on the call localization: operators are asked to make their best effort to provide a good location. These regulations require developments, specifically in the areas not covered by GNSS. As a confirmation of this, the Galileo program includes a specific domain called the "local elements" that includes specifically the indoor domain. It is then quite clear that indoor positioning is a challenging future technical aspect of global navigation. If it is clear that GNSS are the right candidates for global positioning in the places it works well, i.e. where the sky is free enough for the receiver to acquire enough satellites, a lot of possibilities exist concerning both urban canyons and indoor environments. There are typically two directions taken: the first one relies on the use of satellite navigation constellation signals in order to reduce the number of different electronic systems required to achieve the positioning function (and is described with the so-called repeater approach). The second one tries to implement a different technique indoors and the final system will be made up of the integration of GNSS for outdoors and this newly developed one indoors.*

# L'évolution de la navigation et cartographie routière, un exemple à suivre pour l'intérieur ?

■ Philippe SAINT-MARTIN

*Alors que le sujet de la localisation à l'intérieur des sites et bâtiments commence à prendre toute son importance, se pose naturellement la question des cartographies associées. Le développement de la navigation automobile au cours des dix dernières années, n'a été possible que grâce à celui, en parallèle, d'une cartographie numérique spécifique. Sans préjuger de sa pertinence pour l'intérieur, la navigation et la cartographie routière offrent un exemple d'une application grand public réussie qui peut enrichir la réflexion actuelle.*

## Quelques rappels sur l'évolution des technologies de navigation routière

Les premiers systèmes de navigation offrant l'ensemble des fonctionnalités de positionnement, calcul d'itinéraire, guidage par pictogrammes et messages vocaux sont apparus fin 1994, avec le lancement en Europe de la BMW série 7 équipée du système Carin développé par Philips. Quelques mois plus tard Mercedes proposait le système Bosch et une série limitée de la Renault Safrane était également équipée du système Carin. Parallèlement à ces systèmes complètement intégrés au véhicule dits de "1<sup>re</sup> monte", une offre de produits seconde monte s'est très rapidement développée.

Ces systèmes de première génération se sont peu à peu démocratisés mais leur technologie n'a pas fondamentalement évolué. La localisation, en particulier, est restée basée sur un processus en deux étapes. Un ensemble de capteurs constitué du signal tachymétrique du véhicule ou de capteurs de roue, d'un gyromètre ou accéléromètre capable de mesurer les changements de direction et pour les tous premiers systèmes d'un compas magnétique fournissent les données nécessaires au processus dit de "dead reckoning" qui est en réalité un calcul d'estimation de la trajectoire du véhicule entre deux instants. Cette trajectoire est ensuite recalée sur

### ■ mots-clés

Dead reckoning -  
Map matching -  
LIASON - Attribut  
cartographique



Exemple de système intégré 1<sup>re</sup> monte.

la géométrie des routes contenue dans la cartographie embarquée par la seconde étape du processus appelée le "map matching" afin d'obtenir une position précise sur la carte.

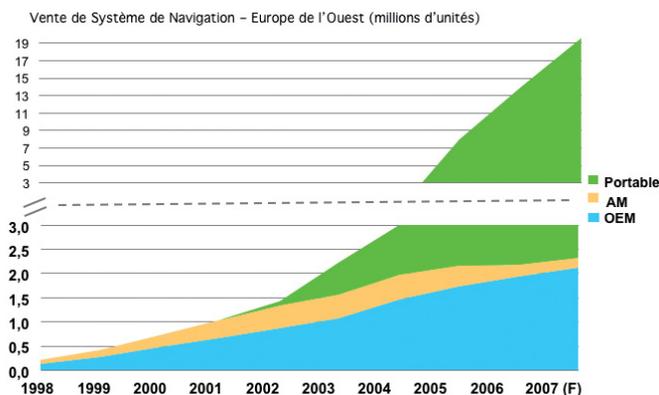
Le GPS, qui n'existait qu'à l'état embryonnaire à l'époque du lancement des premiers systèmes, a pris un rôle de plus en plus important dans la localisation à mesure que sa couverture s'étendait et que le temps de calcul et la précision des récepteurs s'amélioraient. Utilisé initialement uniquement pour effectuer un recalage automatique sur la carte numérique, notamment lorsque le véhicule sortait de la zone couverte par la carte, le GPS a rapidement été utilisé pour calibrer automatiquement les capteurs (gyromètre et tachymètre) puis est devenu une des sources d'information de position principale en étant combiné avec les autres capteurs grâce à l'utilisation des techniques de filtrage de Kalman.

Les supports de cartographie ont également évolué. Les CD-ROM des premiers systèmes qui ne pouvaient stocker qu'un seul pays à la fois ont été remplacés par des DVD pouvant embarquer la carte de toute la cartographie de l'Europe de l'Ouest. Aujourd'hui un nombre croissant de systèmes "première monte" est équipé de disques durs dont la capacité varie de 20G octets à près de 100G octets.

## ■ ■ ■ Développement d'un marché grand public

Depuis quelques années se sont développés des systèmes de navigation portables de plus en plus opérationnels, fonctionnant uniquement à l'aide du positionnement GPS. Grâce à la suppression du brouillage appliqué au signal GPS civil et l'amélioration de la sensibilité des récepteurs GPS ces derniers offrent des performances de positionnement tout à fait satisfaisant en terrain dégagé comme en ville, même s'ils n'égalent pas en précision et robustesse de positionnement les systèmes première monte multi-capteurs. Ces produits, dont les premiers prix sont à moins de 200 € ont permis de démocratiser la navigation et de faire de cette application un produit grand public.

On estime que le marché de la navigation devrait atteindre vingt millions d'unités vendues en 2007 en Europe dont deux millions en première monte. Près de 25 millions de véhicules seraient actuellement équipés, tous systèmes confondus, en Europe de l'Ouest.



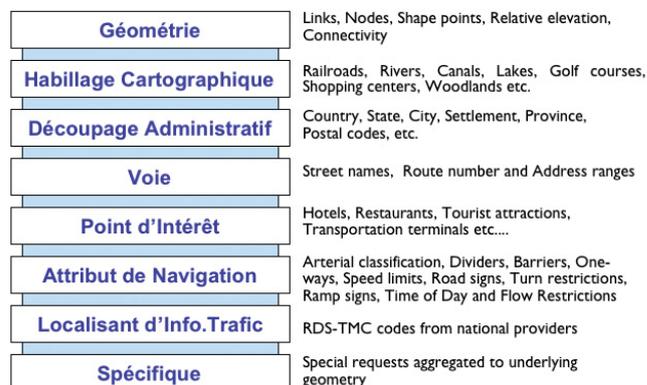
## La cartographie

Les cartes constituent le référentiel essentiel de la navigation routière. Par rapport au carte papier, les cartes numériques navigables sont incroyablement plus détaillées et riches en information facilitant le calcul d'un itinéraire pertinent aussi proche que possible de l'optimal ainsi qu'un guidage fiable du conducteur. On distingue plusieurs couches d'information. La géométrie des voies tout d'abord, constituée de points reliés entre eux par des arcs de longueur variables afin de coller au plus près au tracé réel. L'utilisation de la technologie du GPS différentiel permet d'obtenir une précision absolue inférieure à 5 m et relative de 1 m.

La couche suivante est constituée de l'habillage cartographique, lacs, rivières, zones boisées, voies de chemin de fer, etc. qui permet une représentation visuelle naturelle et facilement identifiable par l'utilisateur. Le découpage administratif comprenant communes, régions, départements, pays... est essentiel pour la saisie d'une destination.

Les voies avec leurs codifications nationale et européenne, leur nom et numéro d'adresse quand il s'agit d'une rue, permettent à la fois de saisir une adresse mais également d'aider au guidage.

## Structure de la base NAVTEQ



La couche de données constituée des attributs de navigation code l'ensemble des informations relatives à la circulation comme les restrictions de tourner, les sens interdits, les carrefours giratoires, etc. Elle joue un rôle capital et spécifique en permettant le calcul d'itinéraires compatibles avec les règles de circulation.

Les points d'intérêt répartis en plus de soixante catégories, constituent une base de données d'informations géo-localisées avec précision qui permettent à l'utilisateur d'accéder rapidement à un hôtel, restaurant, de trouver les stations essences proches de sa position, etc.

D'autres couches d'information peuvent également être ajoutées pour des applications spécifiques comme les points de localisation pour l'information sur le trafic routier, des modèles pour l'affichage de bâtiments en trois dimensions, des guides touristiques, etc.

Au total plus de cent soixante attributs différents renseignent chaque lien de la base de données cartographique.

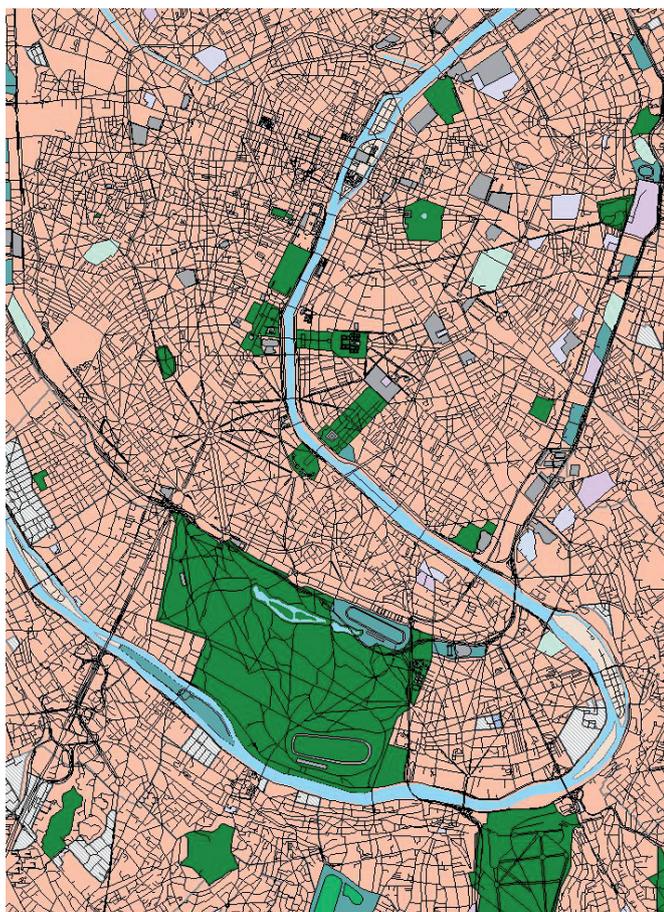
## La cartographie en intérieur

Il serait prématuré, dans l'état actuel des connaissances, d'extrapoler l'expérience acquise sur le routier à la cartographie et localisation en intérieur. Par rapport au réseau routier des différences notables existent qui ont été illustrées par le projet Européen LIASON.

Le processus de localisation sur la carte ou "Map Matching" est radicalement différent. Alors que le modèle routier recherche un segment de route la localisation en intérieur doit identifier un volume comme une pièce ou une sous-zone d'un espace intérieur (stand d'un exposant sur un salon par exemple) et fonctionner dans un espace à trois dimensions en intégrant la notion de niveaux.

Par ailleurs la cartographique nécessite de juxtaposer un modèle de représentation spatiale en volume pour la localisation avec une représentation sous forme de graphe pour le calcul d'itinéraire. En intérieur la cartographie s'apparente à des volumes de présences reliés entre eux par un graphe de déplacement.

Le concept de modèle de données en couches successives et attributs doit cependant pouvoir être repris moyennant une

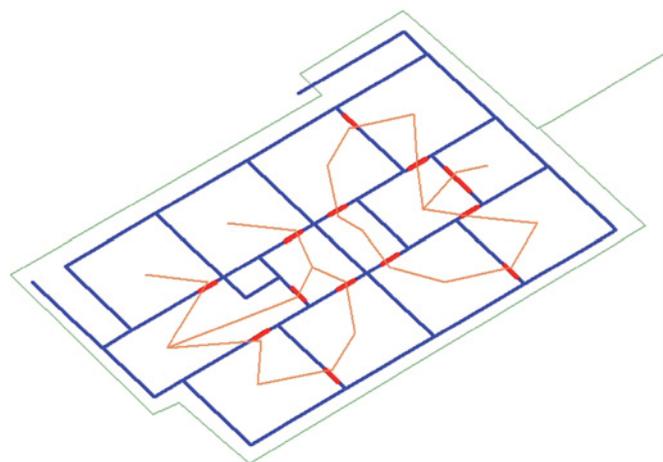
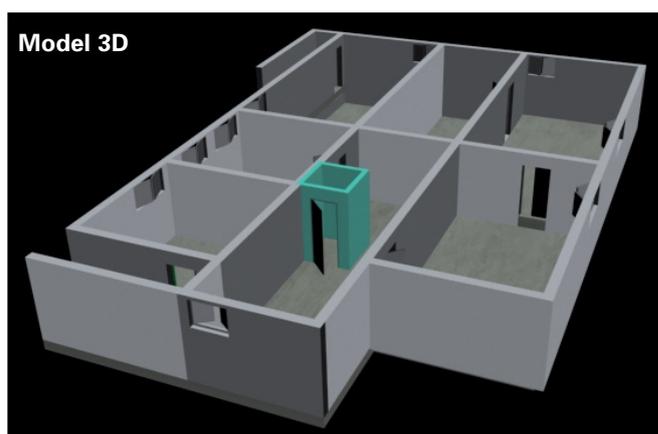


### Géométrie et habillage cartographique

refonte complète de la définition de son contexte. Le tableau ci-dessous donne en première analyse quelques éléments de réflexion concernant les adaptations nécessaires.

Parallèlement de nouvelles technologies de collecte de données adaptées aux sites et bâtiments sont à développer :

- Capture de géométrie



### Espace de localisation et graphe de déplacement

- Traitement en 3D
- Collecte d'informations en pédestre

En conclusion, la navigation routière a montré qu'il était parfaitement possible de mettre à la disposition du grand public, pour un prix accessible, des technologies complexes et sophistiquées de positionnement, guidage et de cartographie. La localisation

<b>Géométrie</b>	- Gérer des espaces (volume) de déplacement (une pièce, un hall) et non plus uniquement des liens à une dimension (route, chemin, voie). - Intégrer trois dimensions de déplacement (étage)
<b>Habillage cartographique</b>	- Définir les représentations de nouveau type de zone et lien (hall d'accueil, bureau, restaurant, ascenseur, escalier, couloir...)
<b>Découpage administratif</b>	- Non défini a priori (un hôpital aura un découpage complètement différent de celui d'un centre commercial). - Créer une structure flexible et adaptable à chaque cas particulier.
<b>Voie</b>	- Créer un graphe de déplacement correspondant à la topologie des lieux et renseigner ce graphe par rapport en fonction.
<b>Point d'intérêt</b>	- Non défini a priori et spécifique à chaque type de bâtiments. Certaines catégories pourraient devenir génériques : chambre, zone de repos, salle d'attente, réfectoire, restaurant...
<b>Attribut de Navigation</b>	- Prendre en compte le temps et... l'effort de déplacement pédestre (un escalier coûte plus qu'un ascenseur). - Inclure les restrictions d'accès : catégorie de visiteur, zone de sécurité, heures d'ouverture, accès pour handicapés...

en intérieur et ses applications associées doivent pouvoir suivre la même voie. Les technologies utilisées seront différentes ou devront être adaptées. La cartographie en particulier peut s'inspirer de l'organisation en couche de données. Elle nécessite cependant un modèle de représentation très différent sous la forme d'espaces localisés en volume reliés entre eux par un graphe des déplacements possibles.

## Glossaire

**Dead reckoning** : Processus consistant à calculer l'estimation de la position, ou de la trajectoire, d'un mobile à un instant  $t$  par rapport à sa position à l'instant  $t-\Delta t$  en intégrant dans l'intervalle  $\Delta t$  les valeurs  $\Delta e$  fournies par des capteurs de déplacement (tachéomètre, gyromètre, accéléromètre, compas...). Les marins pratiquent cette technique depuis fort longtemps en reportant sur leur carte le cap suivi et la distance parcouru fourni par le loch.

**Map matching** : Processus de recalage d'une position estimée sur les éléments topologiques fournies par une carte. Dans le cas de la navigation routière, il s'agit du tracé des voies de circulations. En intérieur les éléments cartographiques seront plutôt des espaces en volume (pièce, couloir...).

**LIASON** : "Location based services for the enhancement of

working environment". Projet de recherche européen consacré au positionnement, communication, planification et suivi de déplacement en intérieur et plus spécifiquement dans des environnements critiques.

**Attribut cartographique** : ensemble des informations décrivant un élément de base d'une cartographie numérique. ●

## Contact

**Philippe SAINT-MARTIN**

Director of Vehicule Strategy

philippe.saint-martin@navteq.com - www.navteq.com

## ABSTRACT

*Indoor positioning is tightly linked to the development of digital cartographies for building and sites. GPS car navigation systems have developed to become a mass market product with digital maps being widely available. There are no reasons for indoor application not to follow the same path. Technologies will be different or will have to be adapted. Maps especially will require a different model combining volume space for localization with a graph of possible path to navigate through while the general architecture of data layers could most probably be reused.*

### **Olivier Reis**

*Ingénieur géomètre-topographe ENSAI Strasbourg  
Diplômé de l'Institut de traducteurs et d'interprètes (ITI) de Strasbourg  
9, rue des Champs F-57200 SARREGUEMINES  
Téléphone : 03 87 98 57 04 Télécopie : 03 87 98 57 04 E-mail : o.reis@infonie.fr*

Pour toutes vos traductions d'allemand et d'anglais en français en  
**topographie - géodésie - photogrammétrie - SIG - cartographie - GPS**

### **Reinhart Stölzel**

*Ingénieur géomètre-topographe  
Interprète diplômé de la Chambre de commerce et d'industrie de Berlin  
Heinrich-Heine-Strasse 17, D-10179 BERLIN  
Téléphone : 00 49 30 97 00 52 60 Télécopie : 00 49 30 97 00 52 61 E-mail : reinhart.stoelzel@eplus-online.de*

Pour toutes vos traductions de français et d'anglais en allemand en  
**topographie - géodésie - SIG - GPS - chemin de fer - routes**

### **Paul Newby**

*Membre de la Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS)  
Diplômé des universités de Cambridge (géographie) et de Londres (photogrammétrie)  
9 Merrytree Close, West Wellow, Romsey, Hants SO51 6RB GB  
Téléphone : 00 44 1794 322 993 Télécopie : 00 44 1794 324 354 E-mail : paulnewby@onetel.net.uk*

Pour toutes vos traductions de français en anglais en  
**topographie - géodésie - GPS - SIG - cartographie - photogrammétrie - télédétection**

**Des topographes traducteurs à votre service**

# Topographie : un demi-siècle d'évolution technologique

## partie 3/4

■ Paul COURBON



IGN - droits réservés

## L'INFORMATIQUE ET LE TRAITEMENT DES DONNEES

*Depuis vingt ans, l'informatique a explosé. Tel un raz-de-marée, elle a tout submergé, et dans les techniques et dans les formations et dans les mentalités. Les sexagénaires sont noyés ! En 1995, alors que je m'étais mis au GPS, j'avais acheté un bon ordinateur portable. Il avait un disque dur de 600 Mégaoctets. Huit ans plus tard j'en ai acheté un nouveau de 30 Giga-octets de mémoire de stockage. Les capacités continuent à progresser ! Mon ordinateur de 1995 n'a plus une mémoire suffisante pour absorber certains logiciels actuels... Cependant, la gestation précédant cette explosion fut beaucoup plus longue.*

## Les ordinateurs et micro-ordinateurs

*(Plusieurs sites de l'histoire informatique ou de musées de l'informatique existent sur Internet. On note parfois des contradictions de dates, allant jusqu'à 10 ans, entre les sites.)*

Depuis longtemps, de nombreuses petites machines à calcul mécaniques avaient été conçues, à partir du XVII<sup>e</sup> siècle en particulier. Entre 1940 et 1944 apparaissaient aux Etats-Unis des prototypes de calculateurs semi-électroniques tels que le Model I de Bell, le Mark I de Howard Alken ou la machine Harvard-IBM. D'après certains auteurs, le premier ordinateur aurait été créé par Atanasoff John Vincent en 1938, mais, s'agissait-il d'une conception purement intellectuelle ? En 1941, l'allemand Zuse aurait lui aussi conçu un ordinateur destiné à aider la conception d'avions et de missiles. Encore faudrait-il définir ce que l'on entend par ordinateur, l'ordinateur n'étant pas un simple calculateur, programmable ou pas. La deuxième guerre mondiale vit les belligérants essayer de mettre au point des calculateurs ou ordinateurs à but militaire, en particulier pour le décodage des messages secrets. L'absence de composants électroniques non encore inventés (le transistor ne le fut qu'en 1947-48) et la taille démesurée des outils mis en place limitait l'utilisation de ces prototypes. L'ENIAC (Electronic Integrator and Computer), construit aux Etats-Unis en 1946, pourrait être considéré comme le premier véritable calculateur ouvrant la voie aux ordinateurs. Il pouvait effectuer chaque seconde 5000 additions ou soustractions, 350 multiplications ou 50 divisions. Couvrant une surface de 150 m<sup>2</sup>, pesant 30 tonnes, il dégageait une chaleur énorme, ses 19000 tubes cathodiques nécessitant une puissance de 140 Kw. De plus, il était commandé par un tableau de connexions qui demandait plusieurs jours de modifications avant d'effectuer un nouveau travail. Les études pour corriger cet inconvénient ouvrirent la voie des recherches sur les programmes enregistrés, avec les travaux de Eckert et Mauchly.

En 1948, la compagnie Bell inventait le transistor, qui dans les années 1950 remplaçait les tubes à vide et permettait de réduire sensiblement la taille des appareils électroniques et leur consommation.



Un ordinateur à l'IGN, dans les années 1970. A côté de l'opératrice, des cartes perforées IBM, derrière elle des bandes perforées et devant une imprimante à picots. Le volume du système est énorme pour une mémoire de quelques Ko ou 10 Ko !

En fait, la première commercialisation d'un ordinateur se fit en 1951, avec le lancement et la vente de l'UNIVAC 1 au bureau de recensement des Etats-Unis.

En 1952, BULL commercialise l'ordinateur Gamma 3 qui sera vendu à mille exemplaires (voir IGN).

En 1953 est inventée la mémoire à tore de ferrite. Le premier disque dur, constitué de 50 disques de 61 cm de diamètre et d'une capacité de 5 Mo est construit en 1956, mais ce type de disque n'apparaîtra couramment dans les ordinateurs que plus tard.

En 1957, premier essai de normalisation des méthodes de travail, avec l'apparition des langages Fortran et Cobol.

En 1958, Texas instrument développe le circuit intégré qui combinait sur un même circuit plusieurs transistors sans utiliser de fil. En 1968, le montage de ces composants sur un petit disque de silicium allait réduire sensiblement la taille et le coût des ordinateurs.

En 1960 les ordinateurs, très onéreux, ne trouvaient d'application que dans les services financiers ou organes gouvernementaux. Bien que constituant un progrès important, les transistors dégageaient encore beaucoup de chaleur, consommant une grande énergie.

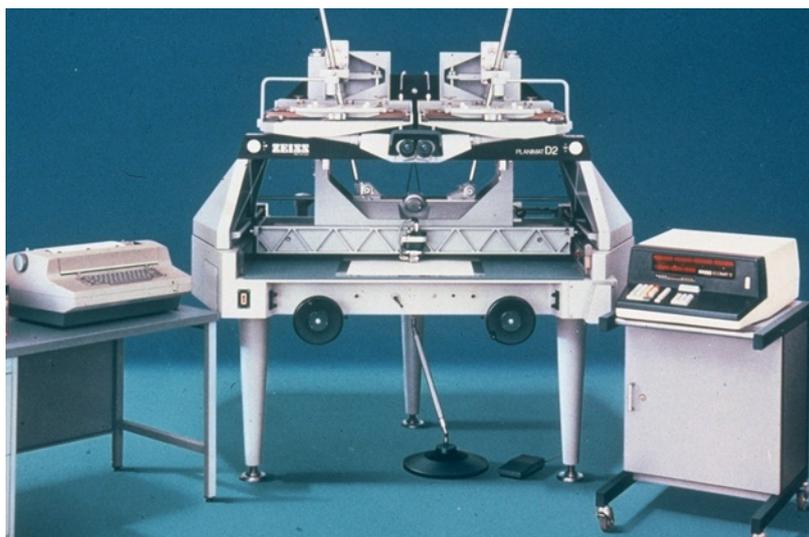
Après 1968, la grande avancée vient de l'utilisation d'un système d'exploitation qui permet de faire tourner plusieurs programmes différents sur une même machine, un programme central contrôlant et coordonnant la mémoire centrale de l'ordinateur.

En 1968, IBM étudie son premier prototype de souris, laquelle aurait été inventée en 1963 par Douglas Englebart. Elle sera améliorée en 1979 par J.D. Nicoud. Mais il faudra attendre beaucoup plus tard, avec Windows (1985) pour voir cet outil se généraliser.

En 1970, les écrans apparaissent comme périphériques de sortie, bien que le premier logiciel graphique interactif ait été étudié dès 1963 et l'imagerie informatique en trois dimensions dès 1967.



Toujours dans les années 1970, un ordinateur IBM et une imprimante, les dimensions sont toujours imposantes.



Vers 1975, un appareil de restitution équipé en vue de l'enregistrement des coordonnées des points. Le micro-ordinateur n'existe pas encore. L'affichage des images ne se fait pas encore sur écran, sur lequel n'apparaissent que des chiffres ou des textes. Le gros coffret informatique en bas à droite est plus important que les unités centrales actuelles. Noter la machine à écrire semi-électronique qui complète le clavier sommaire de l'ordinateur.



Le portable devenu l'outil indispensable de ceux qui se déplacent. On arrive aujourd'hui à des appareils ne dépassant pas deux ou trois kilos.

**Micro-ordinateur moderne. La dimension de l'unité centrale s'est stabilisée à un volume réduit. Depuis peu, l'écran plat a remplacé le lourd et volumineux moniteur.**



En 1971 est développé le premier microprocesseur, circuit intégré permettant de regrouper tous les circuits d'un ordinateur (unité de calcul, mémoire, entrées et sorties) dans un même boîtier (Intel 4004). Durant les années qui suivent, les améliorations consistent à réduire la taille des circuits intégrés. Le LSI (Large Scale Integration) permet de placer plusieurs centaines de composants sur un même support de silicium. Plus tard, l'ULSI (Ultra LSI) permettra d'en placer plusieurs millions.

Le prototype du premier micro-ordinateur, le Micral est conçu en 1973 par le français Gernelle de la société R2E dirigée par André Truong Trong Thi. La même année apparaît la première carte graphique couleur capable d'afficher une image (Xeros PARC).

Encore la même année, IBM invente le premier disque dur où la tête de lecture plane au-dessus du disque sans le toucher.

En 1975, des constructeurs tels que Apple, Commodore, Radio Shack se lancent dans la conception de micro-ordinateurs, construits autour d'un micro-processeur et utilisables par tout le monde. Leur commercialisation se fera presque simultanément en 1977 aux USA, sous le nom de APPLE II, PET et TRS80. Le Basic, langage simplifié de programmation est inventé pour traiter des problèmes relativement simples.

Mais, il faudra attendre le début des années 1980 pour voir le micro-ordinateur prendre son essor et son utilisation par plu-

sieurs géomètres français. En 1981, IBM lance son ordinateur personnel : le PC (Personal Computer). De 1981 à 1982, le nombre de PC dans le monde passe de 2 à 5 millions.

Il faut noter que le premier PC dit "portable" nécessitait des aptitudes de déménageur, il apparut en 1981 (Osborn Computer). En 1983, apparaît le PC-XT avec un disque dur de 10 Mo (à comparer avec 2005 !).

En 1984, Apple introduit le Macintosh vendu 21 000 F en France. Compte tenu de l'inflation, cela équivaut à plus de 6500 euros en 2005.

Aujourd'hui, la mémoire et la puissance de travail des micro-ordinateurs ont explosé, ils font presque office d'ordinateur, reléguant ces derniers au seul service des grosses structures.

A titre d'exemple, la mémoire de stockage d'un micro-ordinateur qui pouvait atteindre 65 Mo en 1980 est actuellement à 120 Go et peut dépasser 1 ou 2 To sur certains modèles. Il en est de même pour la mémoire vive utilisée pour faire tourner un logiciel, elle est passée de 8 Mo en 1993 à 2 Go sur certains ordinateurs personnels actuels. La fréquence aussi a fait un bond depuis la fin des années 1990 pour passer de 66 Mhz à 512 et même 1 375 Mhz actuellement. Nous parlons ici des PC fixes et non des portables. On a même introduit des ordinateurs à double processeurs couplés qui ont encore accru la vitesse de travail.

...

## Les calculatrices

Hewlett-Packard semble avoir produit la première calculatrice électronique en 1968, c'était la HP 9100 A et B d'un prix de 4 900 dollars ! Mais cet engin lourd et intransportable était réservé au bureau. La deuxième génération apparut en 1971 avec la HP 9810 A d'un prix de 2 960 dollars... le premier à utiliser les LED (Light Emission Diode) de couleur rouge ou verte pour lecture sur écran. Les cristaux liquides arrivèrent 2 ou 3 ans après.

En 1972 apparaissent les HP 35 et 65, premières calculatrices programmables et portables.

En 1973-74 apparaît la HP 45, la première à donner le dernier X, elle avait 9 registres de stockage et donnait les fonctions trigonométriques en degrés, grades et radians. Le paradis pour les topographes ! Son prix, 800 dollars aux E.U. et 8 000 F en France, devait représenter plus d'un mois et demi du salaire d'un très bon ingénieur.

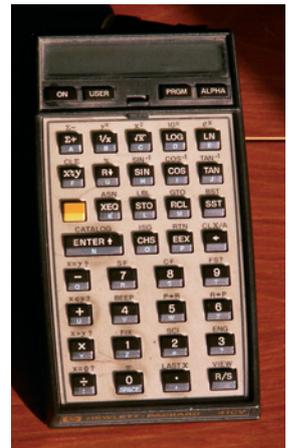
En 1975, HP sort sa deuxième génération de calculatrices portables avec les HP 10 à 29. En 1975, Texas Instruments sort sa première calculatrice programmable, la TI SR 52. Elle m'était offerte en 1976 pour la Croisière des Sables dont j'étais le navigateur, en vue de calculer les coordonnées des points déterminés par mesures astronomiques. Elle avait 224 pas de programme, un lecteur et enregistreur de carte magnétique.

En 1979 apparaît enfin le summum : la HP 41c. En France, elle valait de l'ordre de 3 000 F (plus de 1 000 euros en monnaie constante !). Cette merveille avait une capacité de mémoire de 2 Ko ou de 4 Ko avec un module, 200 à 400 pas de programme et un lecteur de carte magnétique. Aujourd'hui on en est à 512 Ko et plus, pour un prix 20 fois inférieur... Cette calculatrice utilisait la notation polonaise inverse, vraiment très astucieuse, mais qui demandait un certain temps d'adaptation. Cette notation a été abandonnée par HP, au profit des notations classiques, car elle lui faisait perdre des parts de marché, face à la concurrence aggravée par l'augmentation du nombre de fabricants !



Deux calculatrices de la génération 1975. Une calculatrice de bureau la HP 97, plus lourde et qui peut imprimer les résultats. La calculatrice de terrain HP 32 S II, beaucoup plus légère !

Maintenant, avec les programmes intégrés aux stations totales et les logiciels de calcul sur ordinateurs fixes, la calculatrice a perdu une grande part de son intérêt pour les topographes. Et pourtant, dans des cas particuliers, en cas de problème dans un chantier éloigné, elle peut encore servir ; comme son couteau, son bout de ficelle et ses allumettes au scout ! Ceci est surtout valable pour la jeune génération à qui l'informatique a enlevé la pratique du calcul mental. Trop souvent, elle ne sait plus faire des calculs élémentaires de tête et même retenir le numéro de son propre téléphone portable !



La HP 41 cv, merveilleuse calculatrice qui enchanta de nombreux topographes.

## Exploitation et mise en œuvre de l'informatique

### Les systèmes d'exploitation pour micro-ordinateurs

*De nombreux systèmes ont été imaginés, mais nous nous bornerons aux principaux.*

Lors de l'apparition des micro-ordinateurs, CP/M était le système le plus connu. En 1981, IBM va équiper ses micro-ordinateurs du PC-DOS issu de Q/DOS (Quick and Dirty Operating System). Quant à MS-DOS, il est longtemps resté la base des systèmes d'exploitation grand public de Microsoft. En 1984, Microsoft présente pour Apple : "Interface Manager" qui va donner naissance en 1985 à la première gamme de Windows (Windows 1 à 3.11). C'était une interface graphique pour compatibles PC basée sur un noyau MS-DOS. En 1995, avec l'apparition de Windows 95, MS-DOS perdit en théorie son statut de système d'exploitation. Les micro-ordinateurs, sauf Apple, sont vendus actuellement avec Microsoft Windows qui occupe une position quasi monopolistique.

### Les systèmes de lecture et de sauvegarde

#### ■ Les premiers systèmes

Dès le début, les cartes perforées furent utilisées pour entrer les données et même stocker les résultats. Il est bon de rappeler que les cartes perforées avaient déjà été utilisées par Jacquard, en 1805, pour ses métiers à tisser ! Il y eut ensuite les bandes perforées dans les années 1960, nous avons vu leur utilisation sur le Reg Elta 14 de Zeiss. La carte perforée a



Côte à côte, une disquette 3 1/2 pouces, un CD, une clé USB

progressivement disparu pendant les années 1970 remplacée par les unités d'entrée-sortie à bande magnétique puis à disquettes souples de format "8 pouces".

Quant aux bandes magnétiques, elles furent utilisées dès le début de l'informatique pour stocker les calculs intermédiaires ou les résultats. Bien qu'il y ait d'autres systèmes, elles sont encore largement utilisées pour sauvegarder des données, une bande de 10 cm de diamètre atteignant actuellement une capacité de 400 Go.

### ■ Les disquettes et Cédéroms

En 1971, IBM lance la première disquette 8 pouces. Elle sera remplacée en 1977 par la disquette 5 1/4, d'une capacité initiale de 160 Ko.

En juin 1982, Sony présente un prototype de lecteur de disquette 3 1/2 (standardisé plus tard à 1,4 Mo). Cependant, il faudra attendre la fin des années 1980 avant qu'il ne remplace entièrement les 5 1/4. A titre d'exemple, les Logabax acquis par l'IGN en 1984 ou le Goupil acheté pour mon cabinet de géomètre en 1987 avaient encore des lecteurs 5 1/4. Le stockage et l'archivage des données et des dossiers pouvaient se faire par l'intermédiaire du ZIP dont la mémoire des disquettes passera de 10 à 100 Mo, puis 250 et 750 Mo. Ces disquettes ont maintenant disparu.

En 1982, Sony et Philips annoncent un nouveau support numérique à haute capacité : le CD-Rom. Mais il faudra attendre 1984 pour voir commercialiser le premier modèle pour PC par Philips, au prix de 1 000 dollars aux E.U. et près de 10 000 F en France. En France, les premiers micro-ordinateurs munis d'un lecteur de CD (700 Mo) incorporé apparaîtront vers 1995 et munis d'un graveur de CD, vers 2000. Aujourd'hui, avec les normes USB, les disques durs externes permettent de stocker jusqu'à 500 Go.

### ■ Les clés USB

A partir de 2001, apparaissent les clés USB (Universal Serial Bus), petit périphérique de stockage qui utilise une mémoire flash et un connecteur USB. Leur capacité n'a fait qu'augmenter. Aujourd'hui on atteint 250 Mo pour les modèles courants, mais on peut largement dépasser le Go. Ces clés sont le moyen le plus pratique pour les échanges de données entre portables ou micro-ordinateurs.

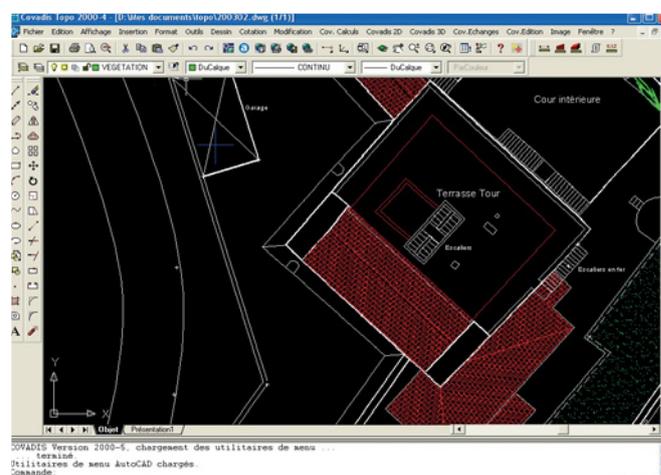
## Le Dessin Assisté par Ordinateur (DAO)

En 1979, j'étais allé au Mexique, explorer l'une des plus grandes cavités mondiales connues, avec des spéléologues texans de l'Université d'Austin. J'avais participé avec eux à une séance de topographie. Si les levés souterrains se faisaient toujours d'une manière classique, les calculs et reports sur plan se faisaient déjà en mode informatique. Ils m'avaient exhibé des liasses de listings et des topographies faites sur table traçante où figuraient tous les vecteurs représentant la polygonale principale avec le numéro des stations. Quelques exceptions mises à part, nous n'en étions pas encore là en France ! Surtout chez des non-professionnels.

A partir de 1964 et dans les années 70, plusieurs précurseurs créent des programmes de dessin, mais ces programmes (JS Info, Image entre autres) se limitaient à des dessins simples (profils, parcellaires, semis de points avec chiffrage). Autocad apparut, lui aussi sur MS/DOS, en 1982-83. Il faudra attendre 1985 et l'apparition de windows avec interface graphique pour



Le dessin sur écran en photogrammétrie. L'étape de mise en place du couple photographique est en cours. Au cours de la restitution, le dessin en DAO sera fait sur l'écran de droite avec un logiciel Microstation.



Le logiciel Autocad, le plus utilisé par les géomètres et qui révolutionna leur travail.

■ ■ ■ voir les logiciels de dessin exprimer toutes leurs possibilités. On trouve encore Microstation le mieux adapté au 3D, TopStation de JS Info, mais le plus utilisé par les topographes reste Autocad. Cependant, Autocad conçu pour le dessin industriel, n'était pas utilisable directement en topographie, entre autres, pour le transfert des fichiers d'observation issu des stations totales, puis leur calcul. Il a donc fallu trouver des procédés annexes ou créer des applicatifs, dont les plus connus en France sont Covadis, apparu en 1987, puis Topogis et TopoLisp.

## Internet-ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)

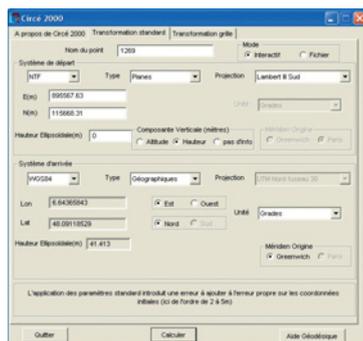
Cette application qui pourrait paraître hors sujet, ne l'est pas du tout, tant elle est utilisée par les topographes, aussi bien pour les transferts de fichiers vers un opérateur lointain que pour l'acquisition de données.

La société américaine Bell avait créé le premier modem permettant de transmettre des données binaires sur une ligne téléphonique en 1958. Les premiers topographes français ne l'utilisèrent pas avant la deuxième moitié des années 1980. Internet et Minitel font leur apparition en 1980. En 1981, 213 machines sont alors connectées sur Internet ! En 1983 on en était à 562, puis à 5 089 en 1986. Ce n'était pas la gloire. Il fallut attendre la deuxième moitié des années 90 pour voir son explosion en France et en Europe.

L'ADSL, transfert à haut débit, transmis par les lignes téléphoniques, mais indépendant des conversations téléphoniques se généralise en France à partir de 2001. Sa traduction française est : "Ligne d'abonné numérique à débit asymétrique" ou encore "liaison numérique à débit asymétrique". Le transport des données utilise une fréquence supérieure à celle d'un signal vocal. Les deux peuvent ainsi circuler simultanément sans interférer.

Il permet de transmettre très rapidement (quelques dizaines de seconde) de nombreuses informations : fichier d'un levé, logiciels, données nécessaires aux topographes telles que les fiches de nivellement ou de points géodésiques IGN.

Il faut noter que depuis 2003-2004, le transfert des données peut être fait par téléphone mobile. Cette technique est maintenant couramment utilisée par le GPS pour les échanges avec les stations permanentes.



**Le logiciel Circé qui permet les conversions de coordonnées. Produit par l'IGN, il peut être chargé par internet.**

## Accessoires annexes

### Les traceurs (ou tables traçantes)

Ceux qui ont fait carrière à l'IGN se souviennent des coordinatographes associés aux appareils de restitution. Ils avaient fait leur apparition dès la fin de la guerre, avec les appareils de restitution Poivilliers. Reliés mécaniquement aux manivelles du restituteur, ils dessinaient à plat, sur une table latérale, les contours suivis par l'index sur l'image photogrammétrique. En ce qui concerne l'IGN, bien qu'ayant encore servi à titre de contrôle au début de l'ère informatique, ces tables ont disparu depuis longtemps. Elles n'ont pas été remplacées par des tables traçantes, les films nécessaires à l'impression des cartes étant maintenant directement conçus à partir du DAO.

Par contre, devant fournir à leurs clients un plan sur support papier en peu d'exemplaires, les géomètres-experts, bureaux d'études, architectes utilisent obligatoirement des tables traçantes. Comme souvent, dans certaines techniques que nous avons abordées, la conception des tables traçantes démarra d'un usage militaire. Vers 1950, l'armée américaine encouragea la conception de traceurs analogiques dans le but de représenter graphiquement les images fugitives données par le radar.

Les premières tables traçantes connectées à un ordinateur apparurent en Europe vers 1963 : il y avait le français Labinal et l'allemand Zuse. Ces tables ne traçaient que point par point. Le cabinet Arragon, géomètre-expert à Solliès-Toucas (Var), précurseur en la matière, testa début 1964 le prototype BENSON 00 couplé à un ordinateur IBM 1130 à cartes perforées, d'une mémoire de 8 Ko ! Il n'y avait pas de programmes sur le marché et les deux informaticiens de ce cabinet en avaient créé un permettant de dessiner, bien que les écrans ne soient pas encore utilisés !

Le dessin fourni n'était pas aussi élaboré que maintenant, mais il permettait la représentation de parcellaires ou de profils. Les bornes étaient représentées par des petits ronds, les cotes périmétriques et numéros de points figuraient aussi. Ces tables traçaient à plat et se rapprochaient du coordinatographe, avec un bras se déplaçant dans le sens des X et sur ce bras, une plume qui se déplaçait suivant le sens des Y. La BENSON 00 avait même quatre plumes pour changer de couleur ou d'épaisseur de trait. Les premières vitesses de traçage étaient de 2 cm/sec.

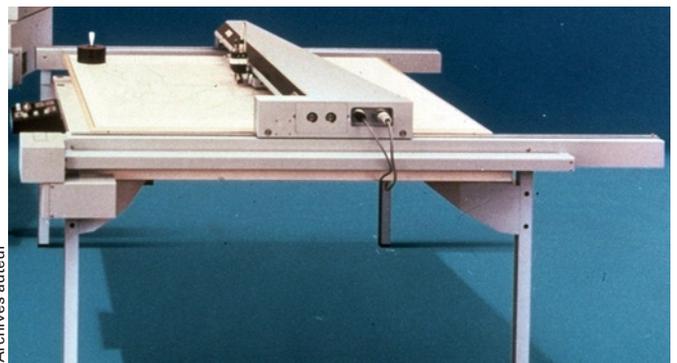
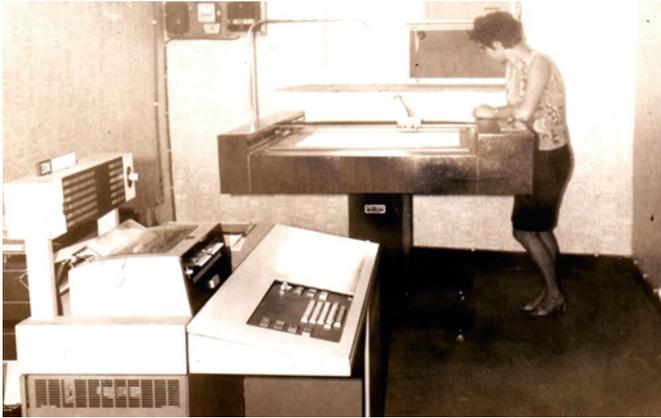
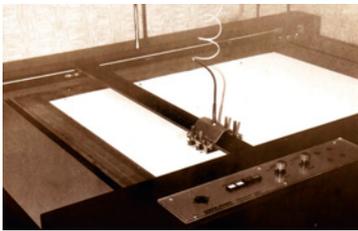


Table traçante à plat associée à un restituteur vers 1975.



**La table traçante Benson 00 associée à un ordinateur IBM 1130. Remarquez la taille de l'ordinateur d'une capacité de 8 Ko ! Pas encore d'écran.**



**La table traçante à plat Benson 00 seule. Remarquer les plumes et le fil électrique en spire qui suit les mouvements de la plume.**

Les traceurs à rouleau apparurent vers 1968. Ces traceurs utilisaient encore des plumes et leur mode de traçage, dit "vectoriel langage graphique", comportait de nombreux aller-retour en Y assurés par la rotation directe ou inverse du rouleau. Le traçage en X était assuré par la translation positive ou négative de la plume.

Tous les points, puis les lignes étaient tracés les uns après les autres, l'ordinateur transmettant à la table un  $\Delta X$  et un  $\Delta Y$  par rapport à un point origine. Le rouleau à picots entraînait le papier ou le calque, perforé sur ses deux bords, ce qui empêchait tout glissement et assurait une précision graphique de 1/10 de mm. BENSON, maintenant disparu, fut le pionnier de ce type de tables en France. Je n'ai malheureusement pas photographié la magnifique table de cette marque que j'utilisais avant son remplacement par une table à jet d'encre qui me coûta quatre fois moins cher !



**Table traçante moderne à jet d'encre, associée à un scanner situé au-dessus avec son écran de commande.**

Elles ont été remplacées par des tables à jet d'encre, plus légères, plus rapides, plus performantes et moins onéreuses, à partir des années 1990. Les informations envoyées par l'ordinateur sont traitées maintenant ligne par ligne, chaque point de la ligne étant représenté avec sa couleur propre. Par contre, il n'y a plus de rouleau à picots et la précision graphique en est diminuée. Benson, racheté par Océ, a maintenant disparu, on trouve encore Calcomp, mais Hewlett Packard est actuellement le leader de ce type de tables.

## *L'évolution de l'informatique vue à l'IGN*

En 1954, l'IGN acquiert l'ordinateur Gamma 3 de Bull, faisant figure de pionnier en équipement informatique. Cet ordinateur n'avait que 5 mémoires et ne pouvait recevoir que 48 ordres élémentaires. Le personnel affecté à cet ordinateur faisait figure de chercheur. Les données étaient transmises par cartes perforées, les calculs intermédiaires passaient aussi par ces cartes. Les résultats étaient perforés sur des cartes, ou imprimés sur des listings. L'ordinateur était tributaire d'un lourd matériel mécanographique, mais il épargnait les fastidieux calculs arithmétiques faits à la main.

En 1955, la normalisation et la résolution d'un système de 224 inconnues furent exécutées en un an !

1958 marque un progrès sérieux avec la multiplication matricielle et la résolution de systèmes linéaires qui correspondaient à des blocs de 10 à 15 points. En 1961 est faite l'acquisition du mini-ordinateur CAB500 produit par la SEA (Société française d'Electronique et d'Automatisme).

Pendant longtemps, l'ordinateur va être tributaire des machines électro-mécaniques annexes qui permettent la lecture des données et la transmission des ordres. Mais, bien que dépendant de ces périphériques extérieurs, il va être petit à petit capable d'effectuer de plus longs calculs et d'enregistrer des programmes de plus en plus importants.

A partir de 1973, l'IGN confie à la SETRA des travaux qui ne passent plus par les cartes perforées, mais par le support des bandes magnétiques. Bien que des essais aient été faits à partir de 1967, ce n'est qu'à cette date que l'IGN acquiert des ordinateurs enregistrant les données et les résultats sur bandes magnétiques. On peut penser aussi que ces nouveaux ordinateurs étaient dotés de systèmes d'exploitation permettant de faire tourner plusieurs programmes sur une même machine, ou de les intégrer.

L'IGN, qui avait été un pionnier en informatique, va un peu tarder à prendre le train de la micro-informatique ; ce n'est qu'en 1984 que sont acquis des micro-ordinateurs Logabax, dotés de lecteurs de disquettes 5 1/4. Grâce aux progrès foudroyant de l'informatique, les micro-ordinateurs vont bientôt

IGN - droits réservés



Un ordinateur à l'IGN dans les années 1970. L'ensemble est volumineux. Remarquez le carton de cartes perforées.

- ■ ■ remplacer les ordinateurs dans de nombreux calculs. Cependant, la sauvegarde des nombreuses données se fait sur un serveur central équipé de disques durs.

Mais, l'informatique ne touche pas que les calculs. Dès 1969, l'I.G. Masson d'Autume décide de créer une unité expérimentale de cartographie automatique. Mais, l'informatique n'avait pas encore atteint tous ses développements actuels et le temps de la gestation fut long. Après un essai réalisé en 1990 sur la carte de Montpellier, la première carte 1/25.000 entièrement numérique est commercialisée en septembre 1995, c'est la coupure d'Amplepuis (2930 ouest). Le temps de mettre en place les nouvelles chaînes et de former le personnel, il faudra attendre encore plusieurs années pour que la totalité des nouvelles cartes soit produite en tout numérique. Cependant, une intervention semi-manuelle est toujours nécessaire pour passer des saisies brutes à certaines contraintes induites par les signes conventionnels, entre autres. Les recherches d'automatisation complète continuent. Adieu les couches à graver et les anneaux...

IGN - droits réservés



Un ordinateur IRIS 80, à la fin des années 1970. Les résultats sont stockés sur bandes magnétiques, mais les cartes perforées, à gauche de l'opérateur, sont toujours employées pour le traitement des données. Les écrans ne permettent que de visualiser les instructions et résultats chiffrés. Pas de souris, les commandes se font au clavier.



IGN - droits réservés

Impressionnante salle des ordinateurs IGN, avec les nombreuses bandes magnétiques de stockage.

Quant au compléteur de 2003, avec son GPS de poche et le micro-ordinateur portable qu'il utilise sur le terrain, il n'a plus rien à voir avec celui qui, en 1976, travailla avec sa planchette au complètement de la dernière coupure 1/25.000 de la carte de base de la France (avec les délais de rédaction et d'impression, elle fut publiée en 1980)!

Nous verrons plus loin l'incidence de l'informatique sur la restitution. ●

## Contact

**Paul Courbon**

Ingénieur des Travaux géographiques (IGN)  
Géomètre-expert DPLG  
paul.courbon@yahoo.fr

## Bibliographie

**DOUSTALY Robert, 1968**, *Le dessin automatique dans la profession de géomètre-expert et son avenir*, opuscule photocopié.

**FONTAINE André, 2000** *Contribution apportée par l'informatique à la géodésie*, Historique de l'IGN, édition intérieure non publiée.

### Suite dans le numéro 113 d'XYZ :

#### L'AVENEMENT DES SATELLITES, LA GEODESIE SPATIALE, LE GPS

*Le GPS - Le GPS à l'IGN - Le GPS en topographie Interférométrie radar satellitaire de précision (irsp)*

#### LA PHOTOGRAMMETRIE

*Stéréopréparation et aérotriangulation  
Restitution  
Les orthophotoplans*

#### EN GUISE DE CONCLUSION

# Quantification globale des écarts géométriques entre plans cadastraux DGI et référentiels IGN dans le cadre du géoréférencement de la BD PARCELLAIRE® en mode Image

■ François CHAHUNEAU - Hélène CLODOT

*La production de la BD PARCELLAIRE® en mode image, étalée sur 3 ans et couvrant 65 départements, constitue historiquement la première confrontation des plans cadastraux DGI et des référentiels IGN menée à si vaste échelle et selon des spécifications homogènes.*

*L'analyse systématique des métadonnées accumulées au cours du projet, effectuée sur un échantillon de 21 départements, permet d'établir la distribution statistique de certains paramètres caractérisant des écarts entre la géométrie des plans cadastraux assemblés dans la BD PARCELLAIRE® et la géométrie théorique de ces plans s'ils étaient traités selon les modalités usuelles de labellisation DGI.*

*Elle permet également de quantifier certaines erreurs du plan cadastral, comme les erreurs de lambertisation présentes dans certaines (rares) zones du territoire.*

*On s'intéresse en particulier aux aspects suivants :*

- *l'impact de l'usage conditionnel du carroyage Lambert*
- *l'impact de l'usage d'une transformation affine en calage*
- *la qualité moyenne du géoréférencement des feuilles non-carroyées*
- *l'impact des déformations locales directes et indirectes*
- *la mesure des discordances en bordure de feuille*

*La présentation synthétique de ces résultats contribue à éclairer le débat sur la compatibilité entre la BD PARCELLAIRE® IGN et les données PCI Vecteur existantes.*

■ mots-clés  
Cadastre  
Géoréférencement  
BD PARCELLAIRE®

**I**l existe dorénavant deux sources possibles de données numériques pour les applications SIG nécessitant l'usage d'un fonds parcellaire :

- Le PCI Vecteur DGI, établi selon des modalités précises concernant essentiellement la fidélité au plan d'origine, et qui sont imposées pour l'obtention d'une labellisation DGI ;
- La BD PARCELLAIRE® IGN, disponible sous forme image ou vecteur selon les zones du territoire, établie selon des modalités qui visent essentiellement à garantir la cohérence avec les autres

composantes du RGE (BD TOPO® et BD ORTHO®).

Les différences dans les conditions d'accès à ces deux produits ou dans leurs modalités de diffusion commerciale alimentent couramment la chronique ; quels que soient les avis exprimés, ils s'appuient au moins dans ce cas sur des informations factuelles.

Mais lorsque le débat porte sur les caractéristiques techniques respectives de ces deux variantes du plan cadastral numérisé, notamment sur les différences dans leur géométrie, on

constate souvent un déficit d'information concrète qui se traduit par des prises de position partisans assez peu fondées, voire des procès d'intention. La question de la compatibilité géométrique entre le PCI Vecteur et la BD PARCELLAIRE®, tous deux issus de la même source initiale, est généralement au centre du débat. La présente contribution a pour but de fournir quelques éléments d'information quantitative objectifs et précis, établis sur la base d'un large échantillon, qui permettront d'apporter certains éléments de réponse à cette question. ■■■

■ ■ ■ Après avoir rappelé le contexte de l'étude et la méthodologie utilisée, on examine les aspects suivants, qui concernent la géométrie de la BD PARCELLAIRE® et ses différences éventuelles avec celle du PCI Vecteur :

- l'impact de l'usage conditionnel du carroyage Lambert
- l'impact de l'usage d'une transformation affine en calage
- la qualité moyenne du géoréférencement des feuilles non-carroyées
- l'impact des déformations locales directes et indirectes
- la mesure des discordances en bordure de feuille

## CONTEXTE DE L'ÉTUDE

### Echantillon de données utilisé

DIADEIS (ex-AIS) est l'un des deux prestataires sous-traitants d'IGN pour la production de la BD PARCELLAIRE® en mode image. Entre mai 2005 et juillet 2007, DIADEIS aura traité 60 % du volume de la production externalisée par IGN, soit 38 départements.

Conformément au cahier des charges, le processus de production mis en œuvre modélise l'ensemble des transformations géométriques appliquées aux données DGI d'origine, et préserve l'intégralité des métadonnées décrivant ces transformations. Ceci est indispensable pour permettre une régénération automatique des dalles de la BD PARCELLAIRE® Image suite aux mises à jour périodiques des plans scannés effectués par la DGI.

Au-delà de leur rôle dans ce processus de jeu, ces métadonnées constituent globalement une base de données unique en son genre, qui comporte beaucoup d'informations sur les relations géométriques entre le plan cadastral et les référentiels IGN. Moyennant certains calculs complémentaires, on peut en tirer divers indicateurs statistiques qui caractérisent globalement les transformations effectuées ou décrivent certains aspects de la géométrie de la BD PARCELLAIRE®.

**Tableau 1 : effectifs caractéristiques**

département	nombre de feuilles	nombre de feuilles carroyées	nb de points d'amer	nb de points locaux	nb de points de raccord
4	2808	226	13865	173	155097
5	2645	402	9281	127	133003
7	2930	942	8393	223	163026
11	4939	1736	14334	220	224525
13	2143	1708	2071	36	60882
18	5066	2231	17654	106	169091
19	4153	1989	8521	191	242678
27	5988	2813	14382	5	232200
29	3753	1719	14677	118	174924
33	6363	2794	21170	202	244295
37	3994	2676	7196	65	143397
39	4612	2521	2877	25	268752
42	3277	1260	10866	88	157861
51	9115	6904	8254	87	291104
52	6883	3673	7926	66	346537
55	7485	4532	7254	27	303699
66	1862	540	7300	179	103226
70	6090	2669	12058	53	294838
71	6550	2592	19680	68	299819
81	3616	1551	12455	156	172959
89	8997	5066	18921	125	362940
<b>Total</b>	<b>103 269</b>	<b>50 544</b>	<b>239 135</b>	<b>2 340</b>	<b>4 544 853</b>

Sur l'année 2006, DIADEIS a traité 21 départements (voir Tableau 1), soit 103 269 feuilles de plan cadastral. Cet ensemble de données couvre une large diversité de contextes géographiques et d'occupation du sol, et constitue ainsi un échantillon raisonnablement représentatif au niveau national.

C'est sur cet échantillon que se base la présente étude.

On notera que cette étude porte exclusivement sur des données accumulées lors de la production de la BD PARCELLAIRE® Image, alors que notre objectif est de caractériser quantitativement les écarts entre la BD PARCELLAIRE® Vecteur et le PCI Vecteur. Les constats et les conclusions établis sur la base de la version Image sont, de fait, en partie transposables à la version Vecteur, car ces deux versions sont produites selon des principes similaires en ce qui concerne le traitement de la géométrie, à l'exception du traitement des raccords.

### Description succincte des transformations géométriques effectuées pour la production de la BD PARCELLAIRE®

Les transformations géométriques appliquées aux plans cadastraux scannés dans le cadre de la production de la BD PARCELLAIRE® Image peuvent se décomposer en trois étapes (outre le détournement de la zone utile), résumées ci-dessous de manière très succincte et avec quelques omissions :

**Géoréférencement** : on applique une transformation affine à 6 paramètres issue d'une estimation par moindres carrés portant :

- sur les croisillons Lambert, s'ils sont présents et exploitables (voir plus loin). Sur chaque feuille, on exploite la totalité des croisillons lisibles ;
- sinon, sur une combinaison de repères absolus (points d'amer = points homologues identifiés entre le plan cadastral

**Tableau 2 : Statistiques de déclassement des feuilles carroyées**

département	nombre de feuilles	nb de feuilles carroyées	nb de feuilles déclassés	%
4	2808	249	23	9.24%
5	2645	435	33	7.59%
7	2930	948	6	0.63%
11	4939	1800	64	3.56%
13	2143	1730	22	1.27%
18	5066	2946	715	24.27%
19	4153	2318	329	14.19%
27	5988	3897	1084	27.82%
29	3753	2372	653	27.53%
33	6363	3059	265	8.66%
37	3994	2862	186	6.50%
39	4612	2571	50	1.94%
42	3277	1348	88	6.53%
51	9115	7032	128	1.82%
52	6883	4343	670	15.43%
55	7485	4583	51	1.11%
66	1862	545	5	0.92%
70	6090	2866	197	6.87%
71	6550	2617	25	0.96%
81	3616	1616	65	4.02%
89	8997	5441	375	6.89%
61	5438	3191	1216	38.11%

et les référentiels IGN, BD TOPO® / BD ORTHO®) et de repères relatifs (points de liaison = points homologues entre feuilles cadastrales voisines).

La répartition homogène de l'erreur de calage est assurée par un calcul de compensation portant sur des blocs de feuilles contiguës. On utilise des facteurs de pondération tels que le géoréférencement des feuilles carroyées n'est pas affecté par ce calcul en bloc.

**Remise en géométrie locale :** on applique des déformations à l'intérieur de la zone utile pour améliorer la cohérence entre le plan cadastral et la BD TOPO® au niveau des axes de voies de communication. On utilise une transformation affine segmentée sur une triangulation de Delaunay, dont les sommets sont des points d'appui dits "locaux", définissant le déplacement local, entourés de points "fixes" qui permettent de circonscrire la zone de déformation. En pratique, cette remise en géométrie locale n'intervient que rarement (voir tableau 1).

**Traitement des raccords :** on assure conditionnellement la fermeture des discordances entre feuilles voisines, par rapprochement de points homologues en bordure dits "points de raccord". Ces rapprochements ne sont effectués que s'ils respectent les tolérances de déplacement définies par la DGI dans le cadre des critères de labellisation. Dans le cas où le déplacement est validé, chaque point de raccord "actif" devient un sommet dans la triangulation de Delaunay.

Les coordonnées image et terrain des points d'appui des différents types sont toutes préservées dans les métadonnées.

Les programmes de calcul utilisés pour cette étude permettent d'appliquer des transformations géométriques partielles aux données brutes. Ainsi, on peut simuler l'application de la seule transformation affine (à l'exclusion des déformations locales), et comparer les résultats à ceux issus de la transformation complète (intégrant les déformations locales).

## Méthodologie générale de l'étude statistique

Le tableau 1 donne, pour chaque département, le nombre de feuilles total, le nombre de feuilles carroyées, et le nombre total de points d'appui posés ventilés par catégorie : points d'amer, points locaux et points de raccord.

Les calculs statistiques exploitent globalement l'échantillon des 103 269 feuilles.

Les paramètres étudiés sont pour la plupart homogènes à des distances, et sont des moyennes arithmétiques ou quadratiques calculées au niveau de l'ensemble des points d'une feuille. Ils sont toujours normalisés par rapport à l'échelle, c'est-à-dire que si E désigne le facteur d'échelle (1000, 2000...), la valeur est multipliée par 1000/E. Ceci facilite la comparaison avec les tolérances DGI qui sont exprimées au 1/1000<sup>e</sup>.

Les distributions statistiques, simples ou cumulées, sont calculées sur la base de 100 classes de largeur égale par division de l'intervalle [min-max].

## ANALYSE DE CINQ ASPECTS CARACTÉRISTIQUES

### Impact de l'usage conditionnel du carroyage Lambert

#### ■ Contexte

Le cahier des charges de la BD PARCELLAIRE® stipule l'utilisation des croisillons ("croisées de carroyage") pour le géoréférencement des feuilles carroyées si ces croisillons sont exploitables. Dans le cas contraire, les feuilles sont "déclassées" et on revient à l'utilisation de points de calage basés sur les référentiels IGN.

Le Tableau 2 donne, pour chaque département de l'échantillon, le nombre de feuilles total, de feuilles carroyées, et de feuilles carroyées déclassées. On y a rajouté le département 61 (Orne) traité en 2005, du fait de ses caractéristiques particulières vis-à-vis du problème étudié.

## ■ Méthodologie

Les causes pouvant conduire à déclarer un carroyage inexploitable sont au nombre de trois :

- carroyage illisible ou insuffisamment lisible (problème de scannage)
- utilisation d'un système de référence local (non-Lambert)
- erreur de lambertisation

Dans tous les cas (sauf le cas 1), on conserve dans les métadonnées l'intégralité des croisillons reconnus avant d'avoir été déclarés inexploitable, sous forme de points de calage inactifs. Ceci permet de calculer a posteriori le "décalage Lambert", c'est-à-dire l'amplitude de déplacement modulo l'intervalle entre deux croisillons. Ce calcul n'a en fait d'intérêt que dans le cas d'erreurs de lambertisation (cas 3), pour caractériser l'amplitude du décalage. Dans les cartes qui suivent, ce décalage Lambert est normalisé par rapport à l'échelle.

## ■ Résultats

### Causes de déclassement

- La lisibilité insuffisante n'a été observée que dans de très rares cas.
- L'usage d'un système de référence local est fréquent dans certains départements. Elle explique la quasi-totalité des 28% de feuilles déclassées du dépt. 27, et une partie des 27% du dépt. 29.
- Enfin des erreurs de lambertisation caractérisées ont été relevées dans les départements 29 et 18. Dans cette catégorie, il faut également citer le cas particulier du département 61 (Orne), traité en 2005, pour lequel la quasi-totalité des 38% de feuilles déclassées était liée à des erreurs de lambertisation.

### Amplitude des erreurs de lambertisation

Les cartes 1, 2, 3 illustrent l'amplitude et la répartition des erreurs de lambertisation dans trois zones où ces erreurs ont été clairement identifiées, par la mise en évidence d'un décalage portant sur un bloc de plusieurs feuilles, en contradiction avec les blocs contigus.

Les couleurs codent l'amplitude du décalage. Les décalages inférieurs à 2 m (jugés non significatifs) ou supérieurs à 50 m (traduisant généralement des erreurs grossières de chiffraison) ne sont

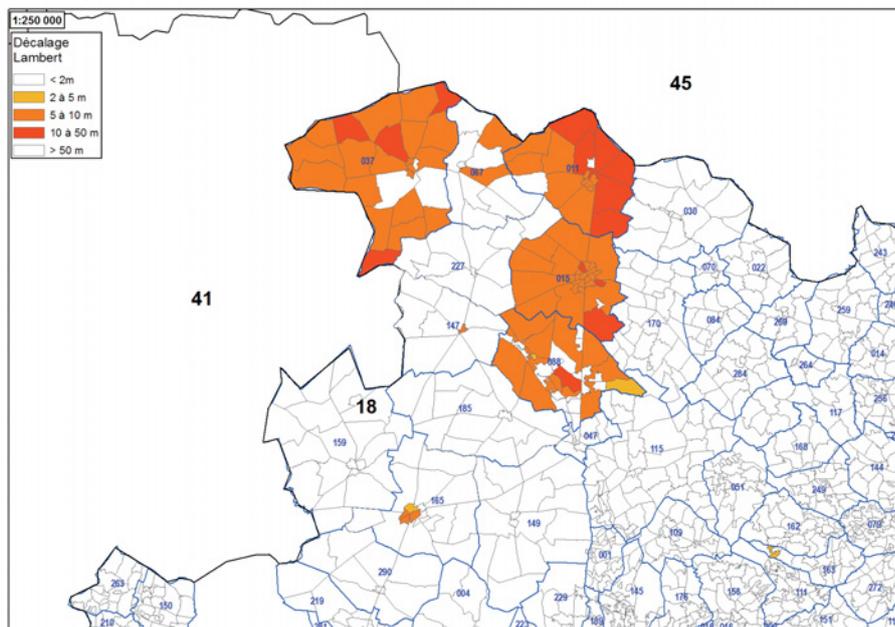


Figure 1 : Feuilles à carroyage Lambert décalé au nord-est du département du Cher (18).

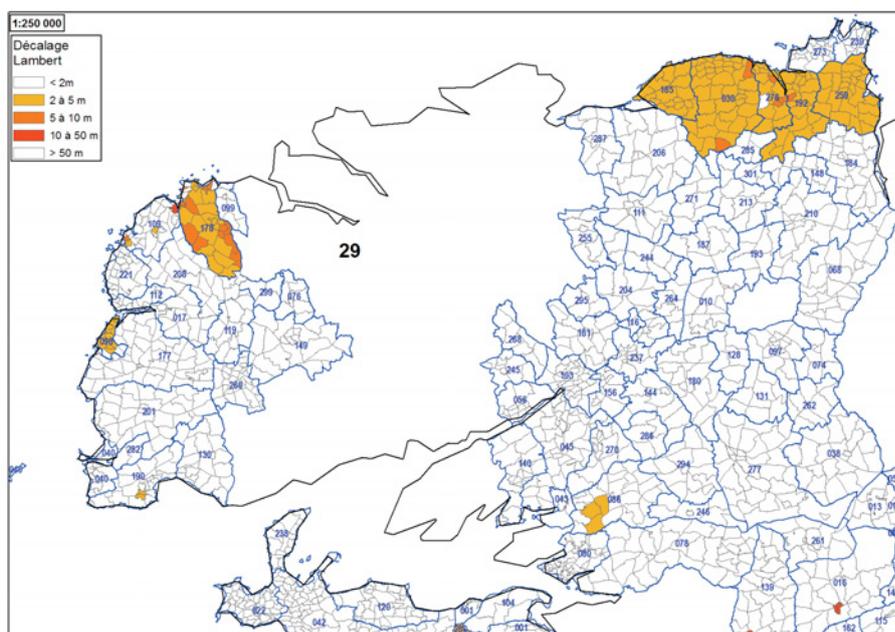


Figure 2 : Feuilles à carroyage Lambert décalé au nord du département du Finistère (29).

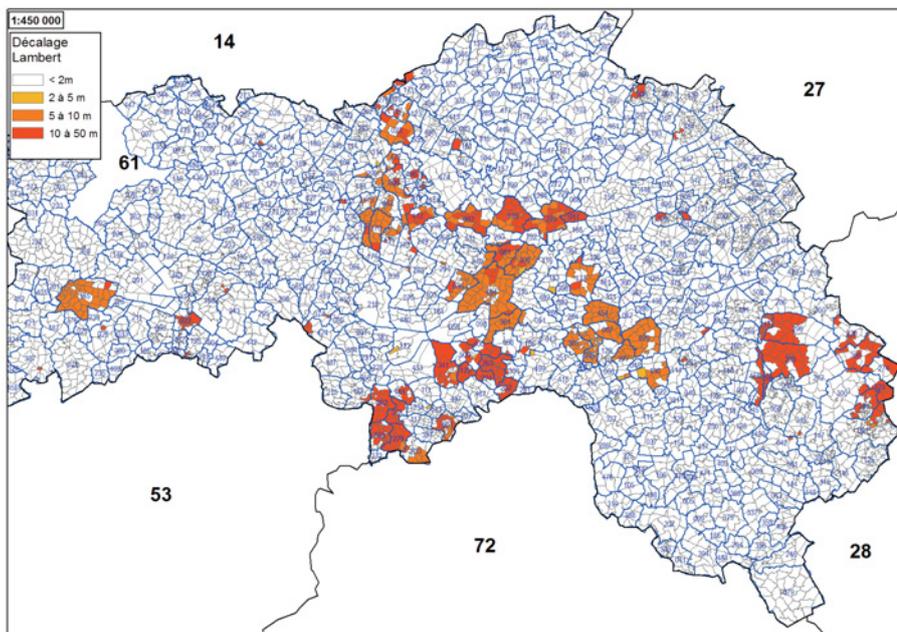
pas pris en compte dans cette étude. Les limites des communes et leur code INSEE sur 3 chiffres sont affichés en bleu, les limites de feuille en gris.

La carte du département de l'Orne (61), cas unique sur l'ensemble des départements traités à ce jour par DIADEIS, illustre l'étendue et l'intensité du problème, avec de fréquents décalages de 10 à 50 m.

### Incidence des erreurs de lambertisation sur la compatibilité PCI Vecteur

Comme on peut l'observer sur les cartes, les erreurs de lambertisation concernent rarement une feuille isolée (auquel cas elles seraient aisément repérables), mais généralement des agrégats d'une ou plusieurs communes.

*Dans ce cas, il faut s'attendre à ce que certains PCI Vecteur réalisés à l'échelle*



**Figure 3 : Feuilles à carroyage Lambert décalé dans diverses zones du département de l'Orne (61).**

d'une commune composée entièrement de feuilles carroyées (ou d'un groupe de communes incluses dans le bloc décalé) intègrent cette erreur, en l'absence de confrontation à une référence externe type BD **ORTHO**<sup>®</sup> ou BD **TOPO**<sup>®</sup> et hormis travaux de réfection. Ceci est d'autant plus vraisemblable que l'erreur est faible (< 5 m).

Notons que, bien que le processus de production BD **PARCELLAIRE**<sup>®</sup> implique un calcul de compensation par blocs, celui-ci utilise des facteurs de pondération tels que le géoréférencement des feuilles carroyées (qui sont celles auxquelles on s'intéresse ici) n'est pas affecté par ce calcul.

## Impact de l'usage d'une transformation affine en calage

### ■ Contexte

Les critères de labellisation DGI imposent l'usage d'une transformation conforme de Helmert<sup>(1)</sup> pour le calage des plans cadastraux, alors que les spécifications de production de la BD parcellaire imposent l'usage d'une transformation affine à 6 paramètres. Par rapport à une transformation Helmert,

une transformation affine introduit deux degrés de liberté supplémentaires :

- une transformation de cisaillement
- une transformation de type homothétie différentielle, utilisant des facteurs d'échelle différents en X et en Y.

De manière générale, les valeurs d'écart moyen quadratique (EMQ) des résidus que l'on obtient en utilisant une transformation affine à 6 paramètres sont toujours inférieures à celles que l'on obtient en utilisant une transformation Helmert.

Pour l'étude de cet aspect, on s'intéresse uniquement au cas des feuilles carroyées correctement équipées. En négligeant le cisaillement, on obtient une estimation du rapport des facteurs d'homothétie en X et en Y d'après les coefficients matriciels estimés par moindres carrés.

S'agissant de feuilles carroyées, la mise en évidence d'un rapport différent de l'unité traduit une déformation de la grille de carroyage, qui est par définition isotrope en X et en Y.

Compte tenu de la technologie utilisée par la DGI pour la dématérialisation des plans cadastraux (caméra numérique type Jumboscan), le procédé de scan-

nage n'est pas le principal suspect pour expliquer cette déformation. Pour les plans anciens, l'origine du problème tient probablement à la déformation dans le temps du support papier qui était utilisé jusqu'au transfert des plans sur support indéformable, ou à des imperfections de la méthode de transfert utilisée.

Quoi qu'il en soit, il est intéressant d'estimer cette déformation et d'en établir la distribution statistique.

### ■ Méthodologie

L'équation d'une transformation affine dénuée de cisaillement s'écrit sous la forme suivante :

$$X_T = ax + by + t_x = S_x \cos\theta x - S_x \sin\theta y + t_x$$

$$Y_T = cx + dy + t_y = -S_y \sin\theta x - S_y \cos\theta y + t_y$$

Où  $X_T$ ,  $Y_T$  désignent les coordonnées terrain,  $x$ ,  $y$  les coordonnées image ( $y$  positif vers le bas),  $t_x$ ,  $t_y$  les termes de translation en X et en Y,  $\theta$  l'angle de rotation et  $S_x$ ,  $S_y$  les facteurs d'échelle en X et en Y.

Le rapport des facteurs d'échelle s'obtient par  $S_x/S_y = ((c^2 + d^2)/(a^2 + b^2))^{1/2}$

En pratique, on définit le coefficient d'élongation X/Y (normalisé par rapport à l'échelle) comme suit :

$$C = (S_x/S_y - 1) \times 1000$$

Ce coefficient peut être positif ou négatif, et s'exprime en mm/m papier (ou m/km au 1/1000<sup>e</sup>). Une valeur positive indique que  $S_x > S_y$ , ce qui traduit un étirement en longueur du plan cadastral d'origine (le coefficient d'échelle  $S_y$  calculé rattrape alors le déficit dans le sens de la hauteur du plan) ; à l'inverse, une valeur négative traduit un étirement dans le sens vertical.

### ■ Résultats

Les figures 4a et 4b donnent la distribution et la distribution cumulée du coefficient d'élongation Y/X.

De l'analyse de cette distribution, il ressort que :

- la distribution est symétrique autour de 0
- 95% des feuilles carroyées ont un coefficient d'élongation Y/X inférieur (en valeur absolue) à 1 mm/m

(1) Composition d'une homothétie, d'une translation et d'une rotation.

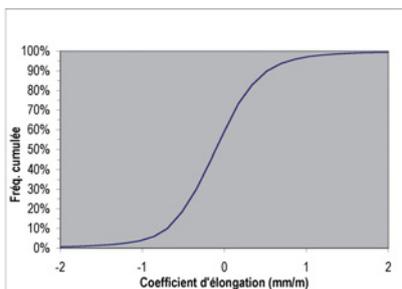
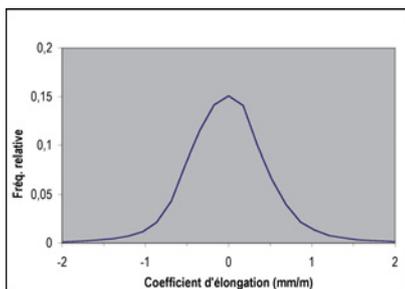


Figure 4a/4b : Distribution du coefficient d'élongation Y/X.

- 50% ont un coefficient d'élongation Y/X d'au moins 0.34 mm/m
- 20 % ont un coefficient d'élongation Y/X d'au moins 0.5 mm/m.

Signalons que les valeurs extrêmes calculées sont de l'ordre de 7 mm/m en valeur absolue au 1/000<sup>e</sup>. De tels cas extrêmes nécessiteraient d'être étudiés de plus près pour savoir si la déformation du support est seule en cause, ou bien s'il faut invoquer une erreur de dessin ou de levé.

Il n'est pas possible d'effectuer des calculs analogues pour les feuilles non carroyées. Cependant, ces feuilles correspondant généralement aux plans les plus anciens, on peut supposer que les taux de déformation sont au moins égaux à ceux mesurés sur les feuilles carroyées.

mément les erreurs résiduelles de calage par un calcul de compensation par bloc, et d'améliorer ainsi le degré moyen d'ajustement des pièces du puzzle cadastral. En l'absence d'erreur sur l'identification des points homologues et sur le positionnement de ces points, l'erreur résiduelle de calage traduit la combinaison de deux effets :

- l'imprécision intrinsèque du plan cadastral

- l'imprécision des référentiels IGN, notamment la BD ORTHO<sup>®</sup> dont la précision est liée à celle du MNT utilisé pour sa rectification.

## ■ Méthodologie

A la différence du géoréférencement sur croisillons pour lesquels l'écart moyen quadratique est classiquement utilisé comme mesure d'ajustement, on utilise ici la moyenne arithmétique des résidus de calage (écarts en position), que l'on appelle "résidu total moyen".

## ■ Résultats

Les figures 5a et 5b donnent la distribution et la distribution cumulée du résidu total moyen (normalisé par rapport à l'échelle).

De l'analyse de cette distribution, il ressort que :

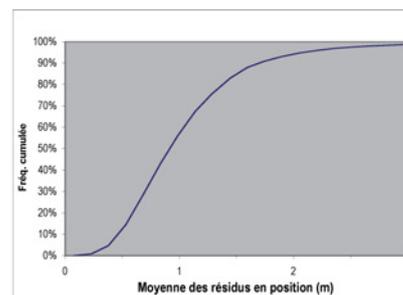
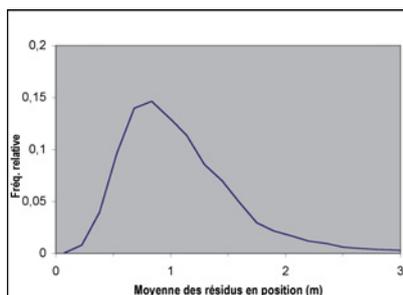


Figure 5a/5b : Distribution du résidu total moyen.

## Qualité moyenne du géoréférencement des feuilles non carroyées

### ■ Contexte

Le géoréférencement des feuilles non carroyées est basé sur l'identification de repères homologues (points "d'amer") entre le plan cadastral et les référentiels IGN (BD TOPO<sup>®</sup> en priorité<sup>(2)</sup> et BD ORTHO<sup>®</sup> ensuite). Il s'agit préférentiellement des intersections des réseaux routier et ferré, identifiables à la fois sur le plan cadastral, la BD TOPO<sup>®</sup> ou la BD ORTHO<sup>®</sup>.

Ce dispositif est complété par l'identification de repères homologues entre planches voisines (points "de liaison") ; ceci permet de répartir unifor-

(2) seule la partie du réseau BD TOPO<sup>®</sup> issu de la photogrammétrie est utilisé comme référence.

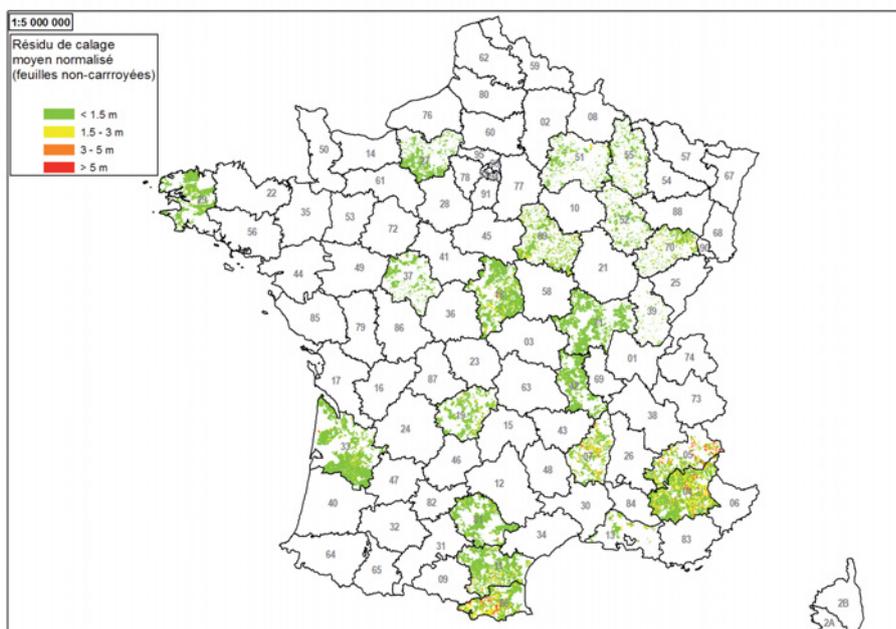


Figure 6 : Distribution spatiale du résidu total moyen.

- 85% des feuilles ont un résidu total moyen inférieur à 1.5 m
  - 98% des feuilles ont un résidu total moyen inférieur à 3 m.
- Ces deux seuils correspondent au niveau de "bonne qualité" et de "qualité médiocre" établis empiriquement par IGN.

La figure 6 montre la carte de répartition spatiale du résidu total moyen, selon une codification couleur. Il est immédiatement évident que :

- le "vert" est largement dominant (résidu moyen < 1.5 m)
- les zones où apparaissent les couleurs orange et rouge correspondent logiquement aux zones montagneuses, qui sont à la fois des zones où les plans cadastraux sont statistiquement les plus anciens et les moins précis (faible enjeu économique) et des zones où la BD ORTHO® est la moins précise.



**Image sur la commune de Dun-sur-Auron (Cher), illustrant le continuum obtenu par assemblage de plans cadastraux à plusieurs échelles, et faisant apparaître les localisants parcellaires (objets ponctuels porteurs des données attributaires).**

## Impact des déformations locales directes et indirectes

### ■ Contexte

Dans le tableau 1, on constate le faible nombre de points d'appui locaux visant explicitement à introduire des déformations à l'intérieur de la zone utile des feuilles : leur fréquence est au maximum de 10 points pour 100 feuilles. L'impact statistique de la remise en géométrie locale sur les déformations moyennes du plan est donc très faible.

En revanche la pose de points de raccords actifs, destinés à appliquer une déformation élastique en bordure, provoque indirectement une déformation qui se propage à l'intérieur des feuilles compte tenu de la méthode utilisée (triangulation de Delaunay). Il est intéressant d'estimer l'importance moyenne de ces déformations combinées.

### ■ Méthodologie

On considère une grille de points uniformément répartis sur la surface de la feuille, d'un pas équivalent à 50 m terrain au 1/1000<sup>e</sup>. Selon les cas, 100 à 200 points se trouvent englobés dans

les parties utiles de la feuille (partie principale, parties détachées ou développements en marge éventuellement présents).

Pour chaque point de cette grille, on applique successivement :

- La transformation affine seule
- La transformation complète incluant les déformations locales, sous l'effet des points locaux et des points de raccord.

On compare pour chaque point les deux positions obtenues, et on calcule l'écart en position.

La moyenne quadratique de ces écarts constitue un indice de déformation (normalisé par rapport à l'échelle).

### ■ Résultats

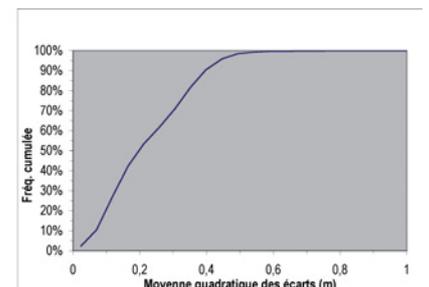
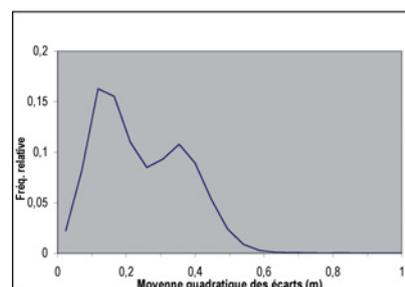
Les figures 7a et 7b donnent la distribution et la distribution cumulée de l'indice de déformation.

De l'analyse de cette distribution, il ressort que :

- 70% des feuilles ont un indice de déformation inférieur à 30 cm
- 99% des feuilles ont un indice de déformation inférieur à 54 cm.

Ces ordres de grandeur sont comparables :

- à la tolérance d'erreur de digitalisation fixée par la DGI dans le cadre des labellisations : 30 cm au 1/1000<sup>e</sup>



**Figure 7a/7b : Distribution de l'indice de déformation.**

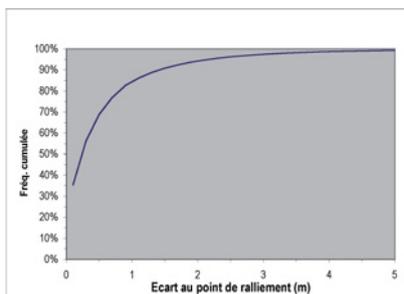
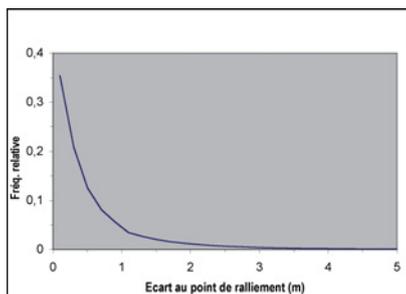


Figure 8a/8b : Distribution de l'écart au point de ralliement.

- aux erreurs liées à la déformation du support papier, dont une estimation a été donnée précédemment pour les planches carroyées ( $\geq 34$  mm/m soit 34 m/km au 1/1000<sup>e</sup> pour 50% des feuilles), et qui ne sont pas compensées dans le cas de l'utilisation d'une transformation d'Helmert (PCI Vecteur).

## Mesure des discordances en bordure de feuille

### ■ Contexte

Dans le processus de production de la BD PARCELLAIRE<sup>®</sup> Image, la pose de points de raccord en bordure de feuille sert à deux choses :

- fermer localement la discordance par déformation élastique locale, si la distance de déplacement est inférieure aux tolérances fixées par la DGI. Le point de raccord est alors dit "actif" ;
- caractériser l'amplitude de la discordance non résolue dans le cas contraire. Le point de raccord est alors dit "inactif".

Dans les deux cas, un "point de ralliement" théorique peut être défini en suivant les règles de pondération par l'échelle énoncées par la DGI. Dans le cas des points de raccord inactifs, le déplacement est virtuel.

### ■ Méthodologie

Pour chaque point de raccord, on calcule la distance à parcourir entre la position initiale du point et le point de ralliement<sup>(3)</sup>, que l'on normalise par rapport à l'échelle.

(3) La largeur totale de la discordance est (en fonction de l'axe du déplacement) inférieure ou égale à la somme des déplacements (réels ou virtuels) des deux points de raccord homologues

### ■ Résultats

Les figures 8a et 8b donnent la distribution et la distribution cumulée de l'écart au point de ralliement. Cette distribution est établie sur la base des 4 544 853 points de raccords intra et inter-communales disponibles (actifs ou inactifs). De l'analyse de cette distribution, il ressort que :

- 77% des points de raccord ont un écart au point de ralliement inférieur à 0,7 m au 1/1000<sup>e</sup> (tolérance de déplacement DGI pour les feuilles carroyées).
- 85% des points de raccord ont un écart au point de ralliement inférieur à 1 m au 1/1000<sup>e</sup> (tolérance de déplacement DGI pour les feuilles non carroyées). Ceci signifie également qu'il existe au minimum 15 % de raccords inactifs.
- 2% des points de raccord (inactifs) ont un écart au point de ralliement supérieur à 3,5 m au 1/1000<sup>e</sup>.

### Conclusion

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- Les écarts entre la géométrie de la BD PARCELLAIRE<sup>®</sup> et du PCI-Vecteur, s'ils peuvent être ponctuellement importants, restent globalement modérés comme le montrent les distributions statistiques présentées.
- Les déformations locales introduites par le processus de production IGN restent statistiquement du même ordre de grandeur que les erreurs intrinsèques au PCI Vecteur (tolérance de digitalisation, non-compensation des déformations des plans papier).
- Des écarts de grande amplitude (décalages de plusieurs mètres) sont à attendre dans les zones affectées par des erreurs de lambertisation des feuilles carroyées. ●

## Remerciements

Nous adressons nos remerciements à l'équipe BD PARCELLAIRE<sup>®</sup> IGN qui nous a autorisés à utiliser les données mentionnées dans le cadre de cette étude, et a accepté de relire le contenu de cette communication.

## Contacts

François CHAHUNEAU

Directeur des Technologies

Hélène CLODOT

Chef de Projet BD PARCELLAIRE<sup>®</sup>

DIADEIS

24, rue Marc Seguin 75018 Paris

francois.chahuneau@diadeis.com

helene.clodot@diadeis.com

## ABSTRACT

**Keywords:** Cadastre - Georeferencing - BD PARCELLAIRE<sup>®</sup>

*The production of the raster version of the BD PARCELLAIRE<sup>®</sup>, a three-year project spanning 65 French departments, historically constitutes the first country-scale confrontation – using homogeneous specifications – between cadastral maps issued by the French DGI<sup>(1)</sup> and geographic reference data produced by IGN. Systematic analysis of meta-data gathered through the production process (using a sample of 21 departments) provides the basis for computing statistical distributions of various parameters, which characterize geometric discrepancies between the BD PARCELLAIRE<sup>®</sup> (a raster continuum) and individual cadastral maps as handled through the usual, DGI-certified process. We also examine certain types of intrinsic errors associated with cadastral maps, from a quantitative point of view. This study casts some light on the ongoing debate about compatibility between IGN's BD PARCELLAIRE<sup>®</sup> and existing DGI-certified digital cadastral maps known as "PCI Vecteur".*

(1) Direction Générale des Impôts.

# Représentation 3D architecturale du temple d'Auguste et Livie à Vienne (Isère)

■ Céline RAVIER

*La lasergrammétrie est un domaine en plein essor; les performances des lasers scanner ont été grandement améliorées ces dernières années, permettant des levés plus précis en un minimum de temps. Jusqu'à présent cette technique était utilisée principalement dans l'industrie pour le levé de tuyauteries, dans le bâtiment, ou encore sur des ouvrages d'art; le marché s'ouvre aussi de plus en plus à l'architecture, notamment dans le cadre de la conservation du patrimoine. Même si le levé est grandement facilité par les prouesses des lasers scanner, le traitement reste une étape complexe surtout lorsqu'il s'agit d'un édifice du patrimoine architectural (caractérisé par des formes complexes qui diffèrent d'un monument à l'autre). La société TPLM-3D, spécialisée en lasergrammétrie, souhaite améliorer ses méthodes de modélisation afin de satisfaire au mieux les attentes des architectes, archéologues et conservateurs. L'étude résumée dans cet article présente la méthode de modélisation mise en œuvre en vue de la représentation architecturale 3D du Temple d'Auguste et Livie à Vienne en Isère (Figure 1). Une autre préoccupation de cette équipe de géomètres, était de pouvoir quantifier la précision obtenue sur un modèle de ce genre.*

**E**n 2005, une première étude a été réalisée sur la chapelle St Vincent située à St-Laurent-d'Agnay dans le département du Rhône. Elle avait pour objet la mise en place d'une méthode de modélisation adaptée à l'architecture, permettant la création d'images de synthèse haute résolution, de modèle 3D navigables dans un environnement de réalité virtuelle ou encore de films d'animation [FAB05]. Cette année, l'objectif a été d'appliquer cette méthode à un monument plus complexe (moultures, chapiteaux, zones dégradées) et de l'améliorer en conséquence. Des méthodes de contrôle permettront de quantifier la précision obtenue à l'issue de ce processus de modélisation.

## Le Temple d'Auguste et Livie à Vienne (38)

Il s'agit d'un temple romain de style italique, pseudo péripptère construit dans

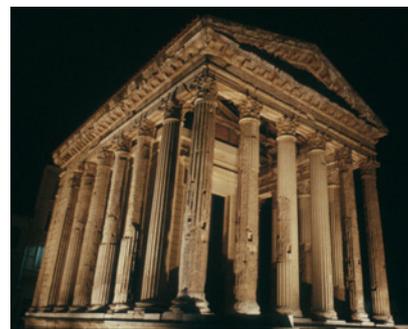
les années 20-10 avant J.-C. Il est situé à Vienne en Isère, sur le côté occidental d'un forum orné de majestueux portiques, de monuments commémoratifs et de statues impériales. Jadis consacré à l'empereur Auguste et son épouse Livie, ce temple nous est parvenu dans cet état de conservation grâce à ses réutilisations successives: transformé en église dès le début du



**Figure 2.** Temple d'Auguste et Livie, planche XIII, II<sup>e</sup> partie [REV31].

## ■ mots-clés

Modélisation 3D,  
Architecture,  
Précision



**Figure 1.** Temple d'Auguste et Livie de nuit.

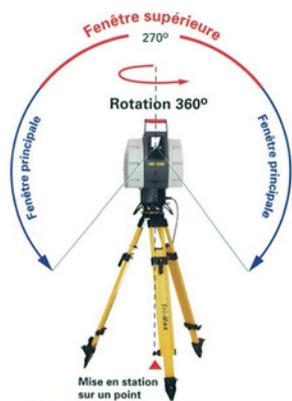
Moyen Age et consacré au culte chrétien, s'installa ensuite le club des Jacobins pendant la révolution, puis un tribunal, un musée et une bibliothèque au début du XIX<sup>e</sup> siècle (Figure 2). Sa restauration fut engagée à l'initiative de Prosper Mérimée en 1850 afin de supprimer les transformations qu'il avait connues. [TCD41]

## Technique de levé

Un chantier de modélisation 3D texturée fait intervenir trois types de levés: un levé laser scanner terrestre, un levé tachéométrique et un levé photogramétrique.

## ■ Levé lasergrammétrique

La société TPLM-3D est équipée du laser scanner terrestre HDS 3000 (Leica Geosystems). Le levé d'un bâtiment est composé de plusieurs stations de scans



**Figure 3. Champ de mesure du laser HDS 3000.**

réparties autour de l'objet afin d'obtenir un nuage de points le plus complet possible. En multipliant les points de vue, on élimine les masques qui cachent l'objet et empêchent la mesure. L'instrument, sur trépied, est relié à un ordinateur, le module "scan" du logiciel Cyclone permet de guider le laser et gère les données renvoyées par ce dernier. Le système HDS 3000 dispose d'un champ de 360° par 270° (Figure 3) ; un éditeur de scripts permet de définir une liste de scans (dimension de la fenêtre de scan, densité de scan) comportant tous les scans à effectuer depuis la station, les scans sont ainsi effectués les uns à la suite des autres de façon automatique.

Le levé du Temple d'Auguste et Livie a nécessité 8 stations de scans (5 autour du temple, 3 à l'intérieur), le nuage de points global comporte environ 50 millions de points. Afin de regrouper les nuages de points issus des différentes stations de scans, en un nuage unique, on dispose, sur l'objet et ses alentours des cibles qui vont servir de points de



**Figure 5. Cible bleue et blanche "tilt and turn".**



**Figure 4. Cible noire et blanche autocollante.**

calage pour le géoréférencement. On distingue les cibles bleues et blanches, "tilt and turn" (Figure 4), que l'on fixe sur un crapaud, elles ont l'avantage d'être orientables face au scan et sont donc bien détectées, les cibles noires et blanches (Figure 5), autocollantes, posent plus de problèmes lorsque la visée est rasante.

### ■ Levé Photogrammétrique

Il est constitué d'une part d'un reportage photos et d'autre part de photos, prises dans des conditions particulières, destinées au texturage du modèle.

L'appareil photo utilisé est le reflex numérique Canon EOS20D associé à un objectif 20 mm.

- Le reportage photos doit être complet et organisé, il est très utile lors de la modélisation pour pallier aux éventuels défauts du nuage de points.
- Les prises de vue destinées au texturage du modèle sont réalisées par temps nuageux afin de limiter le contraste entre les photos et de minimiser les ombres. L'appareil photo est fixé sur un trépied et on utilise le retardateur. De cette façon, on limite le mouvement de l'appareil lors de la prise de vue. Les photos sont réalisées dans une plage de temps assez courte avec une même configuration de focale, de mise au point et d'obturation pour une bonne calibration de l'appareil. L'orientation des photographies est réalisée à partir d'un minimum de 4 points de calage répartis sur les extrémités de la photo. Ces points de calage peuvent être des points remarquables de l'objet et de ses environs ou matérialisés par des cibles.

### ■ Levé Tachéométrique

Un cheminement polygonal est mis en place sur l'ensemble du chantier ; depuis ces stations, on mesure les cibles et les points remarquables qui vont permettre le géoréférencement des nuages de points et l'orientation des photos. On utilise pour cela le tachéomètre TCRA 1101 qui permet des mesures au laser pour les points inaccessibles.

## Traitement

La première étape du traitement consiste à calculer sous Covadis le cheminement polygonal et les points rayonnés. Le chantier du Temple d'Auguste et Livie est référencé dans un système local appelé par la suite système de référence.

### ■ Géoréférencement des nuages de points

Le calcul, réalisé par l'intermédiaire du module "Registration" de Cyclone, se base sur les points de calage connus dans le système de référence et également mesurés au laser, sur des points homologues entre deux ou plusieurs scans et sur un recalage nuage sur nuage à partir des zones de recouvrement entre les différents scans.

Lorsque tous les scans sont orientés et que les précisions sont convenables (en dessous du centimètre pour des relevés architecturaux et environ 4 millimètres pour des relevés de précision), on peut bloquer la registration et unifier le nuage de points. Cette dernière étape permet de supprimer la redondance des données aux endroits où les scans présentent une surface de recouvrement et d'obtenir un nuage global, unique, facile à manipuler.

### ■ Orientation des photographies

La société TPLM-3D a mis en place son propre logiciel de photogrammétrie, ImgSurveyor, basé sur la méthode des faisceaux. Cette application permet l'orientation des photos indépendamment les unes des autres ou en bloc les unes par rapport aux autres, la création d'orthophotos, le mappage de nuages de points, de plans ou encore de cylindres.

Cet applicatif va être utilisé pour orienter les quatorze photos destinées à texturer le modèle. Le calcul utilise les coordonnées des points de calage dans le système de référence, et ces mêmes points positionnés sur chacune des photos. Un premier calcul est réalisé photo par photo puis un calcul en bloc nous fournit les valeurs compensées des paramètres d'orientation interne : c,

la focale  $x'o$  et  $y'o$  les coordonnées images du point principal ainsi que P1 et P2, les coefficients de distorsion radiale et tangentielle et d'orientation externe:  $X_o, Y_o, Z_o$ , les coordonnées du centre de projection,  $\omega, \gamma, \kappa$ , les angles de la rotation autour des axes X, Y et Z.

## Étude de l'architecture du temple, décomposition en éléments simples

De façon générale, la représentation 3D d'un objet nécessite une décomposition de l'objet en éléments simples. Lorsqu'il s'agit d'un monument du patrimoine architectural, cette décomposition doit respecter les traités d'architecture. Ainsi, chaque sous-objet fait référence à un terme du vocabulaire architectural (Figure 6 [VIG03]).

Une étude plus détaillée concerne les moulures des objets profilés ; elle permet d'associer à chaque profil les moulures dont il est constitué (Figure 7), ceci facilite le dessin des profils lorsque le nuage de points est incomplet ou bruité [BEG03].

## Modélisation

Lorsque les nuages de points sont géoréférencés et les photos orientées, le processus de modélisation peut commencer. Les formes complexes vont être maillées sous 3D Reshaper ; pour le reste, on extrait un modèle filaire sous Autocad.

### ■ Création d'un modèle filaire sous Autocad

Le modèle filaire (Figure 8) est constitué principalement d'arêtes et de profils ; il sert de base à la modélisation et doit donc être suffisamment complet pour représenter l'ensemble des éléments du temple. Le module Cloudworx développé par la société Leica Geosystems vient compléter l'environnement d'Autocad pour permettre l'affichage et la navigation dans le nuage de points. De nouveaux outils permettent de réaliser des coupes et des sélections dans le nuage. Toutes les arêtes doivent être représentées sous forme de polygones 3D ; en ce qui concerne les profils, ils vont permettre de modéliser les objets profilés, ils doivent être suffi-

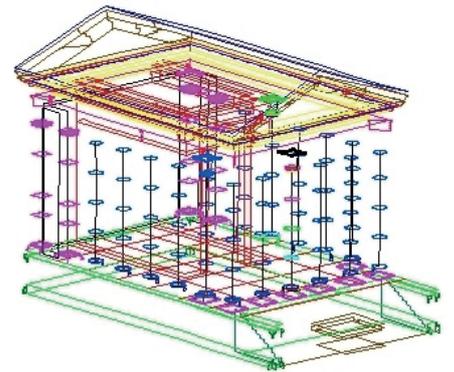


Figure 8. Modèle filaire du Temple d'Auguste et Livie.

samment nombreux pour définir correctement la trajectoire de l'objet ; le nombre de profils est ensuite défini en fonction de la précision attendue sur le modèle et suivant la complexité de l'élément à modéliser.

### ■ Maillage des zones complexes sous 3D Reshaper

De façon générale, on limite au maximum l'utilisation du maillage polygonal ; en effet les modèles obtenus sont très lourds et rendent difficile la navigation interactive. D'autre part, lorsque les objets sont complexes, il est nécessaire, pour que le maillage obtenu soit correct, de disposer d'un nuage de points dense, homogène et très peu bruité. Ces conditions sont souvent difficiles à réunir, la méthode suivante propose une solution qui facilite la modélisation par maillage.

La multiplicité des points de vue de scans ne permet pas toujours d'éliminer les masques. Pour pallier les défauts du nuage de points on s'appuiera sur une étude des symétries. Le reportage photos est dans ce cas très utile. Prenons l'exemple des chapiteaux et des pilastres : on suppose que les chapiteaux des 16 colonnes sont identiques et qu'il en est de même pour les chapiteaux des 4 pilastres ; on va donc modéliser un exemplaire de chaque (pilastre et colonne) et par copie, translation et éventuellement rotation, représenter les chapiteaux de toutes les colonnes. Un deuxième jeu de symétrie permet de reconstituer un chapiteau à partir de la modélisation

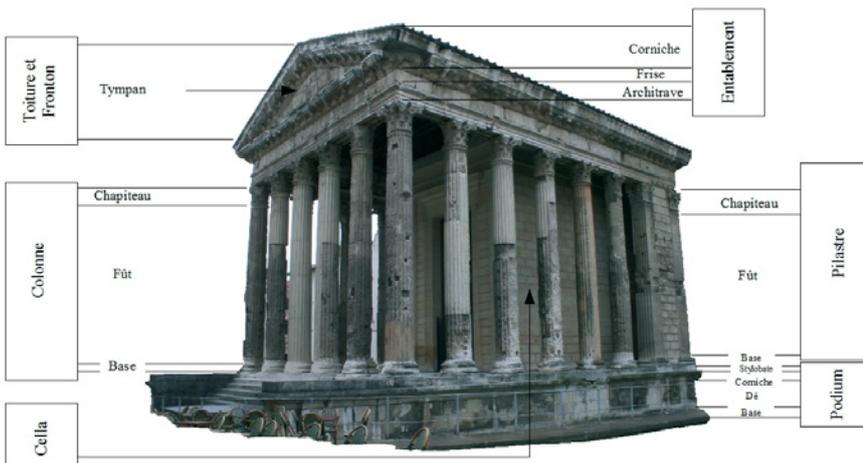


Figure 6. Décomposition du temple en éléments simples.

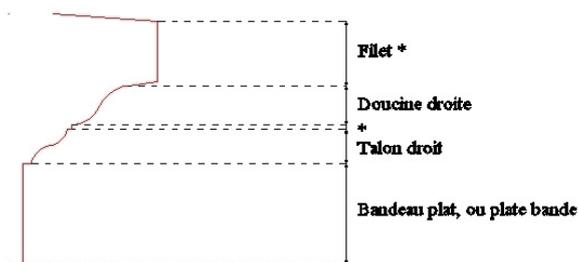
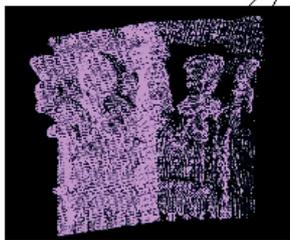


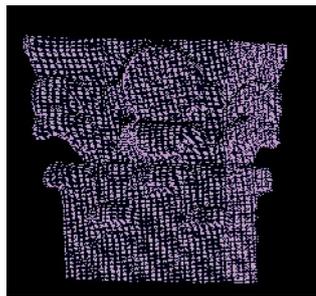
Figure 7. Définition des moulures constituant le profil de la corniche du podium.

Partie du nuage dense et complète

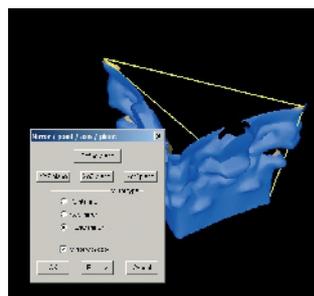
Trous, nuage de points incomplet, peu adapté au maillage



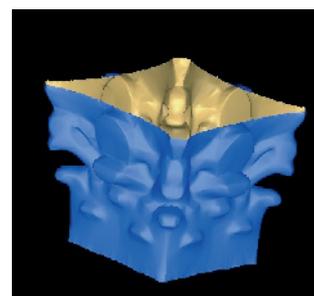
**Figure 9.** Portion de nuage de points du chapiteau d'un pilastre.



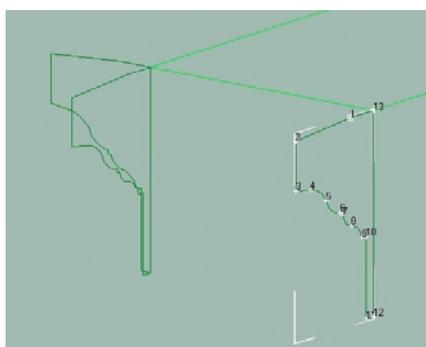
**Figure 10.** Partie de nuage de points nettoyée qui va permettre la modélisation de l'ensemble du chapiteau.



**Figure 11.** Utilisation de l'outil "miroir" pour dupliquer la partie maillée.



**Figure 12.** Maillage du chapiteau du pilastre sous 3D Reshaper.



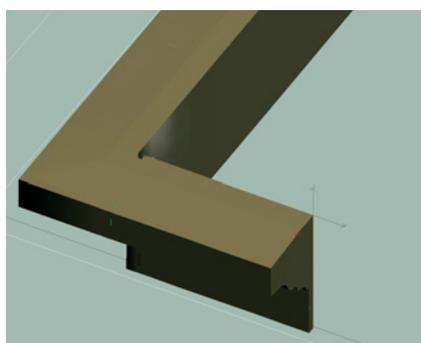
**Figure 13.** Profils de la corniche présente sur le Podium du temple.

d'une seule face de ce dernier. On va donc choisir le chapiteau (Figure 9) le mieux conservé et la face du chapiteau (Figure 10) présentant un nuage de points dense, homogène, avec un minimum de trous et de bruit. Toutes ces conditions garantissent un maillage correct et rapide, puis par copie et symétrie (Figure 11), on reconstitue progressivement le chapiteau dans son intégralité (Figure 12).

### ■ Modélisation TQC sous 3DS Max

Le modèle filaire issu d'Autocad est importé au format dxf sous 3DS Max, applicatif destiné au départ à l'animation 3D, très performant en matière de modélisation ; la maîtrise de l'ensemble de ses outils serait une tâche longue et fastidieuse. Heureusement, seuls quelques-uns d'entre eux vont permettre la modélisation de l'ensemble des éléments du temple.

• *Objets profilés* : On propose dans ce cas, deux méthodes :  
La première consiste à extruder un profil selon une trajectoire donnée

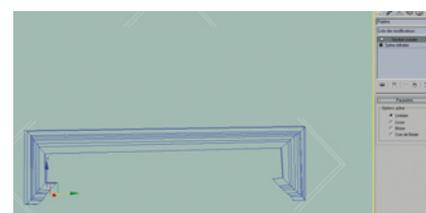


**Figure 14.** Modèle 3D de la corniche présente sur le Podium du temple.

(Figures 13 et 14), il est possible de multiplier le nombre de profils s'ils varient légèrement le long de la trajectoire ; par contre, il est indispensable que le nombre de points définissant les profils soit identique pour tous.

La seconde méthode ne nécessite pas de trajectoire, uniquement des profils, ces derniers doivent cependant être suffisamment nombreux pour définir correctement la trajectoire ; l'opération consiste à attacher les profils entre eux en suivant l'ordre défini par la trajectoire, on les relie ensuite par l'intermédiaire d'un maillage simple (linéaire, lissé ou sous forme d'une courbe de Bézier) (Figure 15), pour finir on crée une surface sur le maillage (Figure 16).

• *Objets assimilables à une forme géométrique* :  
3DS Max dispose d'une bibliothèque de formes géométriques standards assez complète (boîte, cylindre, sphère, plan, tore...) ; lorsque l'on convertit ces objets en polygones éditables, il est alors possible d'agir sur



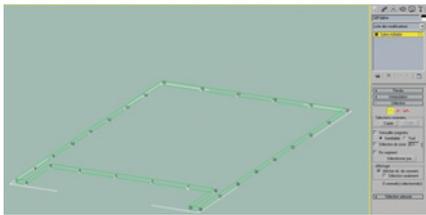
**Figure 15.** L'outil "section croisée" relie les profils par l'intermédiaire d'un maillage.



**Figure 16.** L'outil "surface" crée la moulure sous forme d'un objet surfacique.

les sommets, les arêtes et les faces afin de les déformer. Prenons l'exemple de la construction du stylobate (partie haute du podium du Temple).

Les arêtes dessinées sous Autocad vont servir de base à la construction (Figure 17). On dessine, sous 3DS Max, une boîte (3 points sont nécessaires pour définir une boîte : longueur, largeur, hauteur) à partir de ces arêtes. On peut ensuite choisir le nombre de segments que l'on souhaite placer dans la largeur, dans la longueur et dans la hauteur, afin de définir cet objet. Ces paramètres sont importants, puisque



**Figure 17. Polygones construites sous Autocad.**

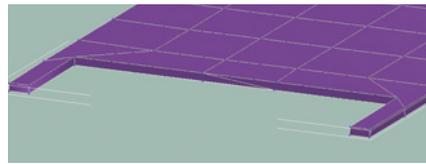
■ ■ ■ lorsque nous transformons l'objet géométrique en polygone éditable, ce sont eux qui définissent le nombre de sommets. On peut ensuite déplacer les sommets de la boîte vers les sommets des arêtes issues d'Autocad (Figure 18) afin de former le stylobate (Figure 19).

Le logiciel 3DS Max possède un éventail de format d'export et d'import très complet, on peut ainsi importer les formes complexes maillées sous 3D Reshaper afin de compléter le modèle 3D.

A l'issue de ces étapes, on obtient le modèle 3D TQC ou "Tel Que Construit" du Temple d'Auguste et Livie (Figure 20); il s'agit d'une représentation idéale de l'objet comme il était juste après sa construction. En archéologie, cette modélisation est utilisée pour masquer



**Figure 20. Modèle TQC du Temple d'Auguste et Livie**



**Figure 19. Stylobate du Podium modélisé à partir d'une boîte.**

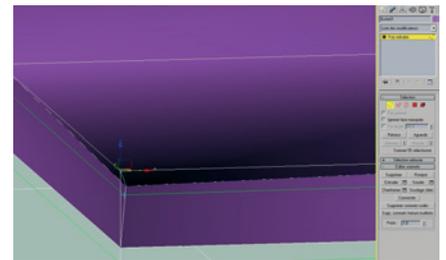
l'effet de l'érosion de la pierre et les défauts mineurs dus au temps. Cette représentation se distingue du modèle TQS ou "Tel Que Saisi" qui est la représentation la plus fidèle de l'objet. Il fait apparaître les zones abîmées par le temps et peut ainsi permettre des mesures directement sur le modèle en vue d'un projet de rénovation. L'étape qui suit présente le passage du modèle TQC au modèle TQS.

### ■ Passage du modèle TQC au modèle TQS par l'intermédiaire de 3D Reshaper et 3DS Max

Les étapes précédentes garantissent une représentation fidèle au traité d'architecture :

- le modèle est constitué de sous-objets ayant chacun leur place dans le vocabulaire architectural.
- les sous-objets sont construits de façon logique (exemple: étude des moulures pour les objets profilés).

Par contre, ce procédé aboutit à une représentation qui ne fait pas apparaître les zones dégradées de l'objet. A l'inverse, une modélisation par maillage polygonal serait plus fidèle à la réalité mais ne respecterait pas les traités d'ar-

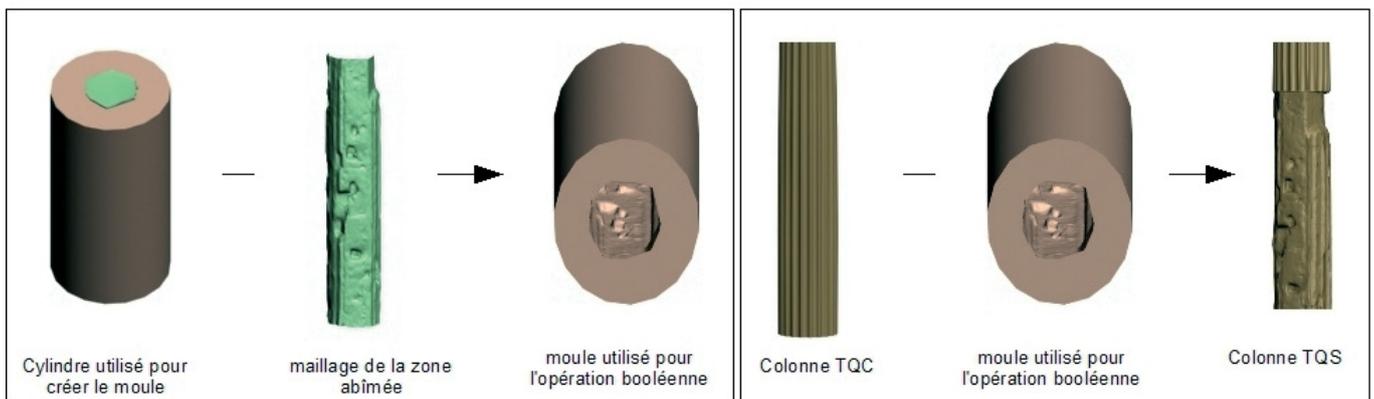


**Figure 18. Déplacement des sommets de la boîte sur les sommets de la polygones.**

chitecture. La solution suivante permet, à partir du modèle TQC obtenu, de réaliser le modèle TQS. Le principe est de creuser, par opération booléenne, le modèle TQC au niveau des zones dégradées. Prenons l'exemple des colonnes: l'objectif est de créer un moule qui va permettre, lorsqu'on le soustrait au modèle TQC, d'obtenir le modèle TQS. Ce moule est créé par opération booléenne entre un cylindre et le maillage de la colonne au niveau de la zone abîmée (Figure 21).

On a réalisé avec le même principe la modélisation TQS de l'ensemble des éléments du temple.

Comme indiqué précédemment, cette méthode permet de respecter les fondements de l'architecture; de plus, elle aboutit à un modèle fidèle à la réalité qui reste le plus léger possible (Figure 20). En effet, le modèle TQS par maillage polygonal d'une colonne fait environ 2 Mo de plus que le modèle TQS de cette même colonne réalisé avec la méthode précédente. Sur l'ensemble du temple, cette différence n'est certainement pas négligeable.



**Figure 21. Modélisation TQS à partir du modèle TQC.**



**Figure 22.** Photo A utilisée pour texturer les colonnes et le podium.



**Figure 23.** Photo B utilisée pour texturer les colonnes et le podium.



**Figure 24.** Masque de la photo B (en noir, zone transparente).

### ■ Texturage du modèle 3D

L'orientation des photographies destinées au texturage du modèle détermine pour l'ensemble des photos les données d'orientation externe ainsi que les données d'orientation interne de la caméra. Ces paramètres sont nécessaires pour texturer le modèle.

Cette étape s'effectue sous 3DS Max :

- On crée dans un premier temps les caméras pour chacune des photos. Sous 3DS Max, une caméra est paramétrée par la focale de l'appareil photo, les coordonnées du centre de projection, et les angles qui définissent l'orientation de l'appareil. Le point principal est placé par défaut au centre du capteur ; si ce n'est pas le cas dans la réalité, il est important de modifier les photos en conséquence (décalage de la photo numérique en fonction des écarts constatés entre le centre du capteur et les coordonnées réelles du point principal).
- On crée ensuite des matériaux "caméra par pixel" composés d'une caméra et de la photo associée. Ce matériau est affecté au sous-objet du temple concerné. Il est possible d'affecter plusieurs textures à un même objet ; on parle alors de matériau composé ; les photos se superposent, l'ordre est donc important.



**Figure 25.** Photo non retouchée utilisée pour texturer les colonnes.

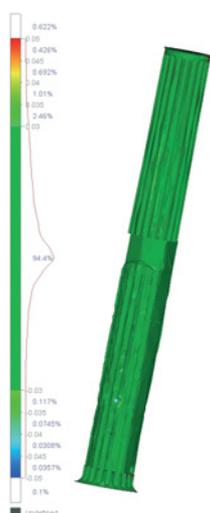


**Figure 26.** Photo retouchée sous Gimp utilisée pour texturer la Cella.



**Figure 27.** Modèle TQS texturé du Temple d'Auguste et Livie.

**Figure 28.**  
Cartographie  
couleurs de la  
colonne 13.



■■■ La création de masques noir et blanc permet de rendre certaines parties d'une photo transparentes laissant ainsi apparaître la photo du dessous. Ceci permet de supprimer les masques présents lors de la photo (exemple : panneau de signalisation, voiture, personne...) (exemple Figures 22 à 24), les outils de retouche d'image du logiciel Gimp sont également assez performants dans ce genre de situation (exemple Figures 25 à 27).

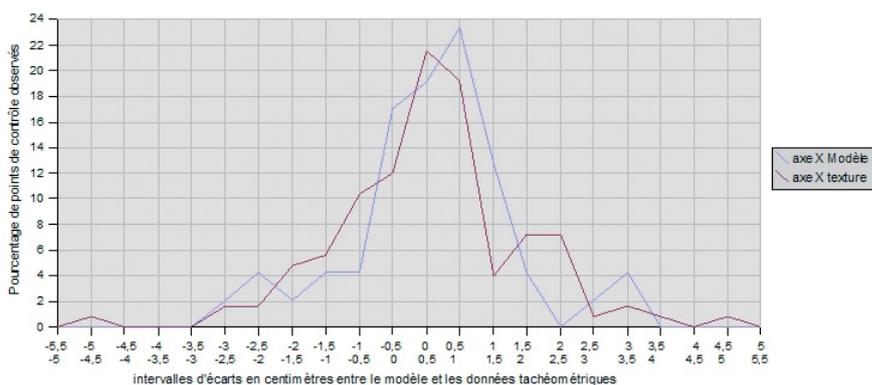
## Étude de précision

Ce projet sur le Temple d'Auguste et Livie a été l'occasion de quantifier la précision du modèle 3D obtenu. Deux méthodes ont été mises en place :

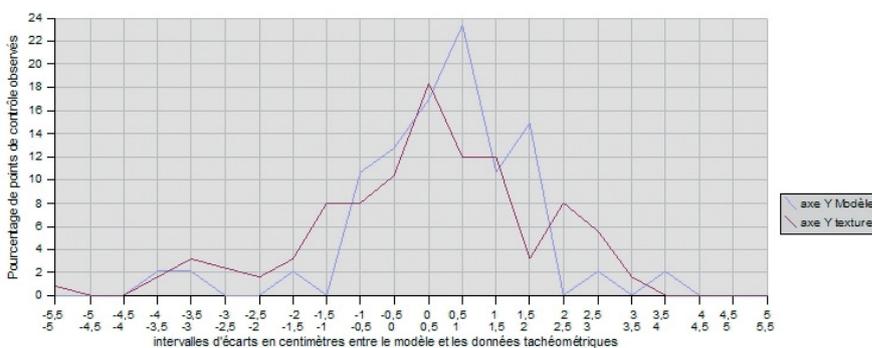
### ■ Outil Compare/Inspect de 3D Reshaper

L'outil d'inspection du logiciel 3D Reshaper permet un contrôle entre le modèle 3D et le nuage de points. A partir des écarts constatés, il crée une cartographie colorée ; une échelle de couleurs classe les points suivant leur écart par rapport au modèle (Figure 28).

Il est recommandé d'utiliser ce moyen de contrôle tout au long du processus de modélisation. Il permet ainsi d'adapter au mieux la méthode de modélisation à l'objet que l'on veut représenter. Cet outil est utilisé également pour le passage du modèle TQC au modèle TQS afin de mettre en évidence les zones dégradées (on s'est fixé une tolérance de  $\pm 3$  cm entre le modèle et la réalité, l'outil Compare/Inspect a permis de mettre en évidence les zones où l'écart avec le nuage de points était supérieur à  $\pm 3$  cm).



**Figure 29.** Courbe de répartition des écarts obtenus entre le modèle 3D texturé et les données tachéométriques pour les points issus du modèle et ceux placés à partir de la texture (selon l'axe des X).



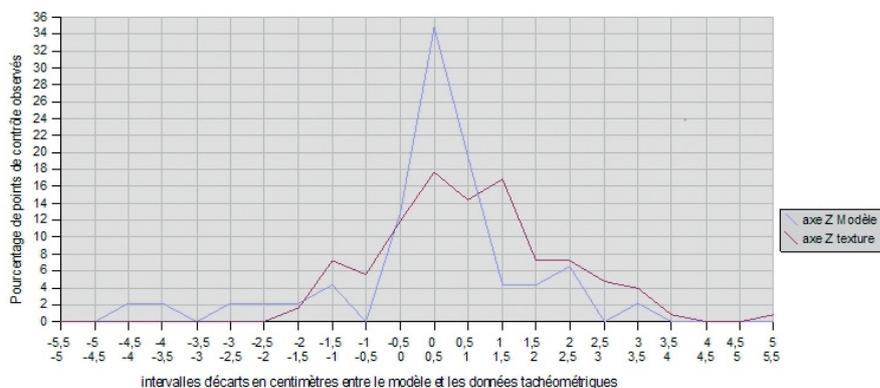
**Figure 30.** Courbe de répartition des écarts obtenus entre le modèle 3D texturé et les données tachéométriques pour les points issus du modèle et ceux placés à partir de la texture (selon l'axe des Y).

### ■ Contrôle par relevé sur site

Des points de contrôle sont levés au tachéomètre sur l'objet et sont comparés aux mêmes points mesurés sur le modèle.

Pour que les résultats soient représentatifs de l'ensemble de la représentation 3D, nous avons relevé environ 200 points répartis sur l'ensemble du

temple. Les coordonnées sont comparées dans un système propre à chaque façade (X et Z, la largeur et la hauteur et Y, la profondeur). Cette méthode permet de comparer à la fois le modèle et les textures. Elle a d'ailleurs mis en évidence un problème de texturage ; les données d'orientation interne et externe issues de ImgSurveyor sont intégrées dans 3DS Max pour texturer



**Figure 31.** Courbe de répartition des écarts obtenus entre le modèle 3D texturé et les données tachéométriques pour les points issus du modèle et ceux placés à partir de la texture (selon l'axe des Z)

le modèle, ce logiciel prenant en compte la focale mais pas les coordonnées du point principal, il le place par défaut au milieu du capteur. L'écart entre le point principal et le centre du capteur est de 7 cm en largeur et 5 cm en hauteur pour une photo prise à 20 m de l'objet avec une focale de 20,57 mm. Ceci n'est pas négligeable et, pour éliminer ce problème, les photos ont donc été modifiées.

La comparaison des coordonnées des points levés au tachéomètre et ceux placés sur le modèle a permis de mettre en évidence des systématismes sur les mesures. En effet, des courbes de répartition des écarts ont été réalisées afin de comparer la précision des points placés uniquement grâce au modèle et ceux placés grâce aux textures ; sur chacune des courbes concernant les écarts en X, en Y et en Z on constate des pics et une répartition non centrée en zéro (Figure 29, 30, 31).

Plusieurs explications sont possibles :

- Le "mauvais" calage d'une photo utilisée pour texturer le modèle peut entraîner une erreur systématique pour tous les points placés grâce à cette photo.
- Au niveau des arêtes de l'objet, le nuage de points présente des points fuyants, ce sont des points qui tapent à moitié sur l'arête et à moitié sur une face en arrière de l'arête, la distance est dans ces cas-là interpolée. Ainsi, au niveau des arêtes, le nuage peut être certaines fois "bruité" et peut entraîner une mauvaise modélisation. En effet, on a tendance à écarter l'arête vers l'extérieur ce qui induit un systématisme.
- Les points de calage, lorsqu'ils sont accessibles, sont mesurés au mini-prisme, mais pour la plupart des points situés en hauteur nous sommes obligés d'utiliser le laser de la station totale qui peut entraîner des erreurs dues à de mauvais pointés ou à un mauvais réglage du faisceau laser.
- Enfin, la méthode de modélisation étant la même pour chacun des objets, il se peut qu'elle entraîne des erreurs systématiques sur chacun d'eux.

## Conclusions et perspectives

Cet article a présenté la méthode de modélisation employée pour la modélisation du Temple d'Auguste et Livie à Vienne (38). Les améliorations apportées à la méthode mise en place par Vincent Fabry en 2005, permettent dans un premier temps, à partir de l'étude de l'architecture de l'objet à modéliser, de réaliser une représentation architecturale adaptée aux besoins des clients (architectes, archéologues, conservateurs). Le passage du modèle TQC au modèle TQS produit un modèle plus fidèle à la réalité tout en respectant la logique de construction ; on atteint de cette façon une précision de quelques centimètres sur l'ensemble du modèle. Cette précision pourra être évaluée et contrôlée facilement, tout au long du processus, par l'intermédiaire du logiciel 3DReshaper. D'autre part, cette étude de précision a permis de quantifier la précision que l'on est capable d'atteindre, sur un monument de ce genre, avec le processus employé.

Les techniques lasergrammétriques sont en constante évolution ces dernières années, les nombreuses études concernant l'application du laser scanner pour la représentation 3D du patrimoine architectural améliorent progressivement les étapes de traitement. De nombreuses perspectives restent tout de même à explorer comme, par exemple, l'association du levé photogramétrique au levé lasergramétrique en intégrant au laser HDS 3000 une caméra métrique de bonne qualité ; ou encore, l'automatisation de l'extraction du modèle filaire sous 3D Reshaper. Enfin, le modèle 3D "pierre à pierre" associé à un SIG 3D pourrait être un produit très utile à nos clients.

Étant donné l'évolution actuelle des logiciels d'architecture vers la 3D, il est fort probable qu'à long terme, le modèle 3D à partir de données laser scanner devienne le produit le plus demandé par les architectes. Le coût de cette prestation reste pour l'instant élevé, l'automatisation de certaines étapes de traitement, permettra d'ouvrir le marché entre les architectes et les fournisseurs de données laser scanner. ●

## Contact

Céline RAVIER

ravier\_celine@yahoo.fr

119, chemin de Belmont - 01700 MIRIBEL

## Références

[BEG03] Begriche, R., [2003]

*Profil: du nuage de points au modèle 3D, Mémoire de DEA, MAP CRAI Nancy.*

[TCD41] Delorme, T.C., [1841]

*Description du musée de Vienne, Isère, précédée de recherches historiques sur le temple d'Auguste et Livie, Girard, libraire éditeur, Vienne.*

[REV31] Rey E., Vietty E., [1831]

*Monuments romains et gothiques de Vienne en France, Paris, 1831.*

[VIG03] De Vignan, J., [2003]

*Le petit Dicobat : dictionnaire général du bâtiment, édition Arcature.*

[FAB05] Fabry, V., [2005]

*Réalisation de modèles 3D texturés type réalité visuelle à partir de données lasergrammétriques et photogrammétriques, mémoire de PFE, TPLM-3D.*

## ABSTRACT

**Keywords:** 3D modeling, Architecture, Accuracy

*TPLM-3D, a firm specialized in land laser scanning technology and 3D modeling, works in various fields: industry, engineering structures, building. The performance of the laser scanners has been greatly improved over the last few years bringing more exhaustive and accurate result in shorter time. In such a way, the 3D modeling market is gradually opening out to the field of architecture and listed buildings. For this type of work the modeling is more complex and requires greater processing time. A methode for architectural modeling was developed last year by Vincent Fabry, an INSA 2005 graduate in surveying. This new process was applied this year to a more complex monument and consequently improved in order better meet the requirements of the main clients (architects and archeologists). The second part of this project aims at studying the accuracy of the textured 3D models obtained.*

■ par Raymond D'HOLLANDER

Sur la terre supposée sphérique, telle que son rayon  $R$  satisfasse à la condition  $2\pi R = 40\,000$  km, on considère deux points  $A$  et  $B$  de même latitude ? et dont la différence de longitude est  $90^\circ$ .

Soit  $\widehat{AVB}$  l'orthodromie de vertex  $V$  dont on désigne la longueur par  $s_0 = \widehat{AVB}$ .

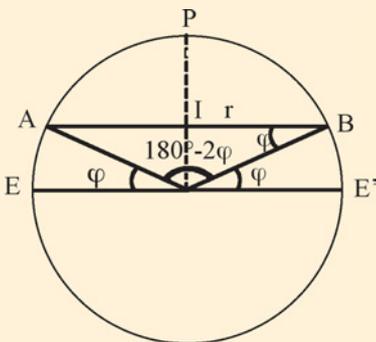
Soit  $\widehat{AIB}$  la loxodromie dont  $I$  est le milieu de l'arc  $AB$ , dont on désigne la longueur par  $s_1 = \widehat{AIB}$ .

- 1 - On demande de calculer la valeur  $\varphi_m$  de  $\varphi$  pour laquelle la différence  $\Delta m = s_1 - s_0$  est maximale. Pour cette latitude  $\varphi_m$  calculer  $s_1$ ,  $s_0$  et  $\Delta m$  exprimés en km.
- 2 - On suppose que la latitude des deux points  $A$  et  $B$  est  $\varphi' = 45^\circ$ . Calculer dans ce cas les longueurs de la loxodromie  $s'_1$  et de l'orthodromie  $s'_0$  ainsi que la différence  $\Delta' = s'_1 - s'_0$ . Exprimer ces valeurs en km. Vérifier que  $\Delta' < \Delta m$ .
- 3 - On demande pour quelle latitude  $\varphi''$  des deux points  $A$  et  $B$  l'écart du vertex par rapport à cette latitude  $\widehat{IV}$  est maximale. Montrer que  $\varphi''$  satisfait à la relation :

$$\tan \varphi'' = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{2}}} = 2^{-\frac{1}{4}} \quad \text{Quelles sont dans ces conditions les valeurs de } s''_1, \text{ de } s''_0, \text{ de } \Delta'' = \widehat{IV}, \text{ toutes ces quantités étant exprimées en km ?}$$

La solution de cette récréation sera donnée dans le prochain numéro d'XYZ.

## Solution de la récréation mathématique du n°111 d'XYZ



1 - L'orthodromie joignant  $A$  et  $B$  est l'arc de grand cercle  $\widehat{AB}$  passant par le pôle terrestre  $P$ . L'angle au centre  $\widehat{AOB} = \pi - 2\varphi$ , de sorte que la longueur de l'orthodromie  $\widehat{APB}$  est :  $s_0 = (\pi - 2\varphi)R$ .

2 - La loxodromie joignant  $A$  et  $B$  est évidemment l'arc de parallèle  $\widehat{AB}$  de rayon  $r = R \cos \varphi$ . La demi-circonférence correspondant à la loxodromie a pour longueur  $s_1 = \pi r = \pi R \cos \varphi$ .

3 - La différence  $s_1 - s_0 = R[\pi \cos \varphi - (\pi - 2\varphi)]$ . Cette différence est maximale si la dérivée de la quantité  $Q = \pi \cos \varphi - (\pi - 2\varphi)$  par rapport à  $\varphi$  est nulle.

$$\text{Or } Q'_{\varphi} = -\pi \sin \varphi + 2 = 0, \text{ soit } \sin \varphi = \frac{2}{\pi} = 0,63662, \text{ soit } \varphi_m = 39,5402^\circ \text{ ou en radians } \varphi_m = 39,5402 \times \frac{\pi}{180} = 0,6901 \text{ rd.}$$

$$\text{Pour cette valeur : } s_0 = (\pi - 2 \times 0,6901) \frac{40\,000 \text{ km}}{2\pi} \text{ soit } s_0 = 11\,213,374 \text{ km}$$

$$\text{Pour } \varphi = \varphi_m : s_1 = \pi \cos \varphi_m \times \frac{40\,000}{2\pi} = 20\,000 \times \cos \varphi_m = 15\,423,562 \text{ km}$$

On a alors :  $s_1 - s_0 = 4\,210,188$  km.

$$4 - \text{Pour } \varphi = 45^\circ = \frac{\pi}{4} \text{ on a : } s_0 = \frac{\pi}{2} \times R, r = R \cos \frac{\pi}{4} = R \text{ et } s_1 = \pi R \frac{\sqrt{2}}{2}$$

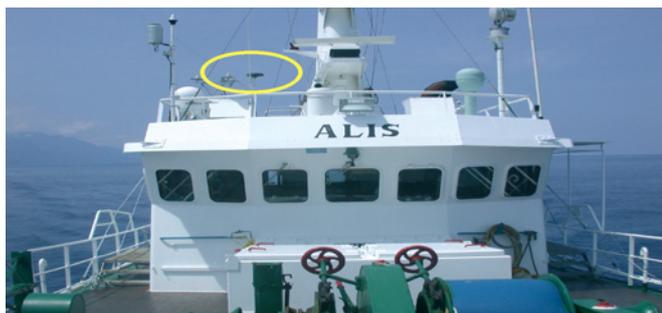
$$s_1 - s_0 = \pi R \left( \frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{1}{2} \right) = \pi R (0,7071 - 0,5) = 20\,000 \times 0,2071 = 4\,142,136 \text{ km}$$

quantité inférieure à celle du 3° ;  $4\,142,136 \text{ km} < 4\,210,188 \text{ km}$ .

## Résumés d'articles proposés au prix de l'AFT non primés

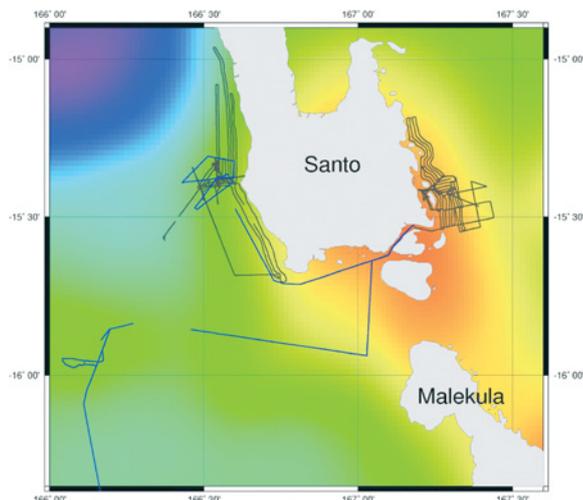
### Mesure de surface de la mer par GPS cinématique : méthodologie et précision/exactitude

■ Rémy BOUILLAGUET



Antenne GPS sur le bateau (entourée en jaune). Elle est située à environ 8 m au-dessus de l'eau.

Afin de suivre les variations spatiales de la surface moyenne et de la bathymétrie autour des îles du Vanuatu, sud-ouest du Pacifique, des mesures GPS cinématiques sur bateau et bouée sont exploitées depuis quelques années. Le but du projet est de caractériser la précision de ces mesures, précision qui dépend de nombreux facteurs tels que la zone de lever, la vitesse et l'accélération du bateau, l'état de la mer... L'étude se base sur les données de deux campagnes de mesure GPS en 2004 et 2006 ; elle porte sur la caractérisation des sources d'imprécision relatives au GPS en mer, l'optimisation du post-traitement cinématique et les différentes corrections à apporter aux observations pour améliorer la précision. Ces travaux doivent nous permettre de connaître pour chaque configuration et environnement de lever le niveau de précision atteint par le GPS cinématique en mer. Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet MOTEVAS, projet commun à plusieurs laboratoires de recherche tels que le LAREG et l'IPGP avec l'aide de l'IRD de Nouméa. ●



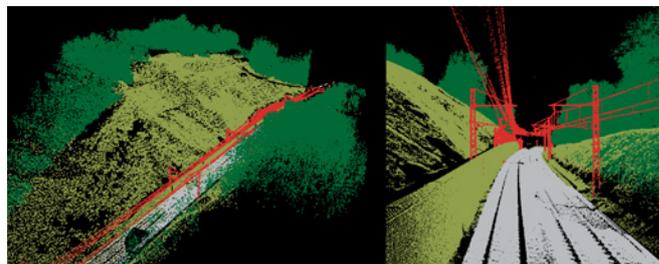
Surface moyenne Topex/Poséidon. Les hauteurs sont en m.

### Suivi de mouvements d'ouvrages par lasergrammétrie : auscultations d'ouvrages en terre de la SNCF

■ Flavien VIGUIER

Dans le cadre d'un projet de recherche visant à améliorer la qualité des suivis des mouvements des ouvrages en terre, la Division de Topographie de la SNCF a décidé de réaliser différentes auscultations à l'aide de lasers scanners. En effet, après analyse des techniques de suivi actuelles (auscultations tachéométriques et GPS par exemple) nous avons constaté qu'il nous était impossible de déterminer rapidement la totalité des mouvements subis par un ouvrage.

Ainsi, cette étude a pour principal objectif d'analyser les capacités de levers et de traitements de la lasergrammétrie. De plus, afin de définir les besoins et donc les précisions à atteindre, nous avons confronté les méthodes d'auscultations "classiques" et lasergramétriques sur deux ouvrages de natures différentes : un déblai végétalisé et un remblai bétonné. ●



Clone numérique de l'ouvrage de Saint Denis Catus.

### Accéléromètre et GPS pour le suivi d'ouvrages d'art : mise en place de filtres adaptatifs pour le couplage des informations obtenues

■ Kadidia DRAMÉ

Afin de permettre la mesure de déplacements millimétriques d'ouvrages d'art, l'unité Travaux Spéciaux de l'Institut Géographique National (IGN) a entrepris la création d'un système hybride GPS/Accéléromètre. Cette étude s'insère dans ce projet et fait suite à celle menée en 2005 qui a démontré la complémentarité des deux instruments.

L'élaboration d'un filtre de Kalman permettant le couplage effectif des données constitue l'objectif principal de mon étude. Ainsi, pour atteindre cet objectif, une réflexion a été menée quant à l'application de la théorie générale du filtre de Kalman à notre cas de figure. Cet article s'attachera à vous présenter les différentes étapes qui nous ont permis de mettre en place les équations d'un filtre. ●

# Expéditions Polaires Françaises

## Missions Paul-Emile Victor

### Extraits des souvenirs de la campagne "Groenland 1950" de la section "Géodésie"

■ Jean BOURGOIN

La création, en février 1947, des "Expéditions polaires françaises" a résulté d'une initiative personnelle de Paul-Emile Victor. Sa participation dans les armées américaines, pendant la guerre, aux opérations de sauvetage dans l'Arctique, lui avait montré le bénéfice d'expéditions mécanisées pour la réalisation de programmes scientifiques dans les régions polaires. Mais sa passion pour l'Arctique remontait à l'avant-guerre, dès 1934. Elle s'était concrétisée, sur les plans sportif et médiatique par la traversée, en traîneaux à chiens, du Groenland en 1936 et son hivernage au Scoresby Sun en 1936-1937. Ces missions n'avaient pu avoir lieu que grâce à la bienveillance, la générosité et l'extrême sollicitude de J.-B. Charcot. C'est ainsi que J.-B. Charcot et son navire polaire, le "Pourquoi-Pas ?" sont intimement associés à la légende de P.-E. Victor et à la renommée des Expéditions polaires françaises.

Lorsque le vieux cargo norvégien Hillevaag appareilla de Rouen pour le Groenland le jeudi 13 avril 1950 à 13 h, nous ne savions pas, y compris les anciens, ce qui nous attendait. C'est d'ailleurs précisément pour cette raison que nous nous trouvions rassemblés, déjà unis sans nous connaître. La passion qui nous animait allait être mise à l'épreuve en de nombreuses occasions. Victor nous l'avait répété : rien ne doit être laissé à l'imprévu mais tout est imprévisible dans l'Arctique. La traversée de l'Inlandsis sur 650 km nous procura les émotions que nous avions souhaitées et imaginées. Le nomadisme glaciaire de notre petite brigade géodésique nous

rapprochait des expéditions de l'avant-guerre. Au gré des vents, nous inventions chaque jour la piste éphémère vers la Station Centrale, ponctuée par nos campements sous tente.

Les notes et rapports qui suivent ne sont pas un roman. Ils concernent quelques épisodes de notre cheminement dans sa partie la plus délicate, située dans la zone de fonte de la neige et de la glace, au-dessous de 1500 m d'altitude. Passage obligé vers la "Terre promise" des neiges éternelles, ses crevasses couvertes de neige sont comme un champ de mine. [...]

Le programme géoscientifique des "Expéditions polaires françaises" au Groenland était axé prioritairement sur l'étude de "l'anatomie" et la "physiologie" de l'Inlandsis du Groenland : nivellement géodésique de sa surface et détermination de son épaisseur sur un certain nombre de profils, étude de la structure verticale du névé, mesure des déplacements horizontaux et verticaux.

Les géodésiens avaient une large part dans l'exécution de ce programme. En 1948 et 1949, ils avaient contribué au tracé de la piste reliant le point de débarquement en Baie de Disko, Port-Victor (Camp I), à l'Inlandsis (Camp III), en dressant une cartographie côtière, et avaient établi une cartographie sommaire des soixante premiers kilomètres sur l'Inlandsis. Les informations et récit qui suivent concernent les travaux de la Section "Géodésie" durant la campagne 1950 au Groenland. La chronologie succincte des opérations fut la suivante : La Section Géodésie participe aux opérations de débarquement du 28 mai au 7 juin, date à partir de laquelle elle guide

le convoi principal vers la Station Centrale. Elle effectue le balisage du Camp III, en bordure de l'Inlandsis (à 13 km du Camp I, alt. 600 m), au Camp IV (à 28 km du Camp III, alt. 1100 m), puis au Camp VI (à 58 km du Camp IV, alt. 1600 m). Elle quitte le Camp VI le 16 juin en poursuivant les opérations de balisage et nivellement jusqu'à la Station Centrale (à 327 km du Camp VI, alt. 2996 m) où elle arrive le 1<sup>er</sup> juillet (route au 60° depuis le Camp VI). Elle en repart le 3 juillet pour baliser et niveler un nouvel axe, orienté au sud-est, sur 250 km, et revient à la Station Centrale le 10 juillet. Du 14 au 25 juillet, elle reprend et complète les opérations de nivellement entre la Station Centrale et le Camp V (à 15 km du Camp VI, alt. 1430 m). Outre la reprise du nivellement entre les Camps V et IV, l'objectif principal de la Section est l'établissement d'une carte et le balisage d'un itinéraire sûr de retour de l'Expédition dans ce secteur.

Malgré d'énormes difficultés dues aux crevasses, aux torrents glaciaires, à une surface chaotique, la mission est accomplie et la Section est de retour au Camp IV le 21 août où elle complète la topographie de cette région. Le 5 septembre ; l'Expédition entièrement regroupée, entreprend la traversée de la zone de fonte entre les Camps IV et III. Le 7 septembre, l'état de la surface oblige à abandonner les weasels et les traîneaux à mi-chemin entre les Camps III et IV. Lourdemment chargés, les membres de la Section atteignent, par étapes, le Camp I le 12 septembre. Après une légère chute de neige, la Section participe aux opérations de

récupération des weasels, la première entre les 22 et 26 septembre, la seconde, plus pénible et périlleuse, entre le 29 septembre et le 2 octobre.

La Section de géodésie se composait de six membres :

– le Colonel Jean Nevière, Chef assistant de l'Expédition au Groenland 1950, qui avait des états de service hors du commun. Brillant géodésien, ancien artilleur colonial issu de l'École Polytechnique (promotion 1920), son parcours professionnel impressionnant avait été une succession d'affectations prestigieuses et d'aventures, dont nous ne retiendrons que sa Direction du Service Géographique de l'AOF et sa pendarion par les pieds, par les Japonais, en Indochine. Nouveau venu dans l'Arctique à 50 ans, mais fort d'une expérience en géodésie polaire acquise au cours des deux campagnes précédentes au Groenland en 1948 et 1949, il avait aussi une autorité morale et un goût tranquille pour l'aventure, particulièrement adaptés aux circonstances imprévues rencontrées en expédition. Second de P.-E. Victor, avec G. Rouillon et M. Perez, il représentait au sein de notre Section l'âme des Expéditions Polaires Françaises :

– Trois autres membres : Jean Bourgoin (X, promotion 1945) jeune ingénieur hydrographe de la Marine, sortant d'École ; Maurice Grisoni, géodésien, passionné de varappe, féru d'hôtellerie ; Jean de Riquer, artiste peintre et graveur, ancien déporté de Dachau (passage de la frontière pyrénéenne pendant la Guerre), topographe, Secrétaire Général de la Mairie d'Oloron Sainte-Marie ;

– La Section géodésie était complétée par un mécanicien Paul-Emile Voguet (à la montée de la Station Centrale), essayeur metteur au point d'une grande firme automobile, puis responsable de la "police mondaine" à Paris ; Camille Marinier (au retour de la Station Centrale), ex-hivernant remplacé par P.-E. Voguet. La Section géodésie disposait de deux weasels, d'une cabine laboratoire montée sur traîneau, de deux traîneaux à matériel.

### Une colonne de weasels d'aujourd'hui



Le franchissement, dans les deux sens, de la bordure de l'Inlandsis pose de graves problèmes aux expéditions motorisées. Dans la région de la Baie de Disko, plus précisément à hauteur de Port-Victor, au fond de la Baie de Quervain, la zone de fonte s'étend sur 65 km environ, à vol d'oiseau distance qui sépare la lisière de l'Inlandsis (Camp III, alt. 600 m) de la limite du gel continu, située à mi-chemin entre le Camp V (alt. 1430 m) et le Camp VI (alt. 1600 m). Cette région est recouverte au printemps d'une couche de neige d'une épaisseur variant de un à quatre mètres lissant tous les obstacles. Le paysage est celui d'une pénéplaine dont la pente moyenne varie de 2 % (entre les Camps III et IV) à 1 % (entre les Camps IV et VI), modulée par des ondulations de faible amplitude (pente atteignant cependant 7,5 % à la "Crête du Restaurant"). Elle est parcourue par un réseau hydrographique éphémère durant l'été, qui hésite selon les microreliefs rencontrés, entre la ligne de pente générale et les lignes de niveau matérialisant les creux des ondulations. Ce réseau alimente par ruissellement des rivières peu profondes creusées dans la glace, appelées "bédières", et des lacs, occupant des dépressions, avant de former des "colorados" entaillant profondément la glace, qui se jettent dans des gouffres en exploitant des fissures. Au cours des mois de juin, juillet et août, la neige fond en totalité jusqu'à l'altitude de 1500 mètres environ (entre les Camps V et VI). La glace sous-jacente subit alors une ablation importante, variant de huit mètres (région du Camp III, en 1949) à 1 mètre (région du Camp V). C'est elle qui prend le relais de la fonte de la neige pour surcreuser le réseau hydrographique et sculpter un chaos de glace vive.

Venons-en aux faits constatés en 1950 : A l'aller, la fenêtre de temps ouverte au passage des convois vers l'Inlandsis est conditionnée par l'état de la banquise au point de débarquement et celui de la neige sur l'Inlandsis permettant le franchissement. En 1950, Port-Victor, au fond de la Baie de Quervain, n'est accessible par notre navire de transport, le Force, que le 6 juin, à la dislocation des glaces. Un échelon précurseur, mis à la côte le 28 mai, gagne sans difficulté le Camp VI le 9 juin. Mais, onze jours plus tard, le 20 juin, la colonne logistique (huit weasels) rencontre les pires difficultés pour gagner le Camp VI qu'elle atteint le 2 juillet : fondrières de neige détrempée, cuvettes transformées en lacs, fragiles ponts de neige sur les crevasses.

Au retour vers la côte fin juillet, les convois affrontent de nouvelles difficultés. Entre les Camps V et IV, la couverture de neige mouillée est suffisamment épaisse pour masquer les crevasses. Malgré les précautions, les risques sont très importants. En dessous du Camp IV, le sol nu de glace vitreuse ou granuleuse forme un champ hirsute de monticules de trois à cinq mètres de hauteur et de trous à "cryoconite", infranchissable par les weasels et les traîneaux. Le passage des convois ne devient possible (dans des conditions acceptables pour le matériel) qu'après les premières chutes de neige d'automne, dans la première quinzaine du mois d'octobre.

En bref, en 1950, la traversée de la zone soumise à la fonte, entre les Camps III et VI, n'est acceptable pour des convois motorisés qu'avant le 10 juin à la montée et après le 10 octobre à la descente. ●

# Nicolas Guiot et Mathieu

■ Jean-Pierre MAILLARD

*Comme son nom le laisse penser, Pougues-les-Eaux est connue depuis l'Antiquité pour les vertus de ses eaux. La ville a développé ses activités thermales au cours des siècles, activités qui se révèlent royales d'Henri III à Louis XIV et des plus florissantes à la fin du XIX<sup>e</sup> et au début du XX<sup>e</sup>. L'aménagement du complexe thermal et du Parc Saint Léger, les maisons et hôtels toujours en place en témoignent de façon significative même si, depuis 1945, le thermalisme appartient au passé. La reconversion des bâtiments est à dominante culturelle. Le Parc et le Pavillon des sources sont le plus souvent investis par les artistes en servant de cadre à l'installation d'œuvres in situ, la réalisation de projets, ainsi qu'à des événements et performances chorégraphiques ou encore au tournage de films vidéo. L'usine d'embouteillage est, elle, devenue aujourd'hui le Centre d'art proprement dit.*

## Le Centre d'art

Créée en 1990, l'Association nivernaise pour l'Art contemporain émanation des pouvoirs publics territoriaux a d'abord proposé la préfiguration du Centre d'art sur le site des Forges royales de Guérigny à 10 km à l'Est de Pougues. Puis, en avril 1992, il s'est établi définitivement dans le Parc Saint Léger déjà propriété départementale. Jusqu'en 1997, l'activité de l'association s'est alors principalement centrée sur l'accueil de jeunes artistes "en résidence" – les logement et atelier étant offerts –, et sur l'édition de catalogues, de livres d'artistes.

A partir de 1998, le Centre d'art s'est installé dans des locaux réhabilités et bien adaptés. Il dispose depuis d'un véritable lieu d'exposition, et d'ateliers pour les artistes. Cet ensemble a été complété en 2002 par l'aménagement de la "Gentilhommière", ancien hôtel jouxtant les autres bâtiments, qui reçoit aujourd'hui l'administration du Centre d'art et quatre logements d'artistes.

Le Parc Saint Léger a développé un important programme d'expositions et renforcé son action auprès des artistes. Aujourd'hui, il affirme davantage sa vocation de lieu de travail, de recherche et de création, tout en cherchant à

inventer d'autres modes de diffusion et de médiation au plus près des publics. Préservé de la pression exercée par les scènes artistiques urbaines, son cadre bucolique est un espace propice à la réflexion, à la concentration, aux échanges intellectuels et conviviaux. La résidence et la durée de visibilité du travail sont définies en fonction du projet de chacun des artistes, auquel il est donné l'espace-temps nécessaire au développement du processus convenu. Dans sa programmation, le Centre d'art ne privilégie pas tel ou tel parti pris esthétique. Il promeut la diversité de la

création actuelle avec, cependant, quelques thèmes récurrents : le paysage et la nature, les espaces et l'architecture sans oublier la peinture. Des événements, des projets de création de danse ou de musique expérimentale peuvent être à l'initiative des artistes ou sur propositions de partenaires régionaux intégrés à la programmation arts plastiques.

Tout au long de l'été 2007, le Centre d'art du Parc Saint Léger a présenté sous le titre "Le Syndrome de Broadway" une exposition de groupe dont l'expression plastique, inspirée par l'œuvre de Piet Mondrian, est à dominante géométrique.

## Le Syndrome de Broadway

À Manhattan, en 1942, Mondrian s'émerveille devant une ville érigée selon des lignes géométriques semblables à celles dont il usait pour représenter la nature dans ses tableaux. Héritier de toute une branche d'art formaliste qui construit rigoureusement, règle des ensembles et équilibre des propositions, Mondrian a inventé avec le mouvement artistique De Stijl l'utopie d'un "art total", abouti à la fin de sa vie dans la série Broadway Boogie



© Yvette Velay

# Mercier au Parc Saint Léger

Woogie, où la forme picturale se conjugue idéalement avec l'esprit de son temps, dans une correspondance parfaite avec d'autres expressions de pensée tels l'architecture, la musique, le jazz en particulier et la danse.

L'exposition met en évidence une filiation entre le post-modernisme de Mondrian et les créateurs d'aujourd'hui qui s'inspirent des codes et conventions de l'ancienne avant-garde. Plusieurs réalisations ont dû dérouter le spectateur même averti. On retiendra cependant l'intérêt suscité par la plupart des pièces qu'elles soient peintures, collages ou installations. Les œuvres de Nicolas Guiot et Mathieu Mercier sont les plus rigoureusement géométriques.

## Encombrant de Nicolas Guiot

La sculpture monumentale, et paradoxalement minimaliste, mise en place par Nicolas Guiot investit le lieu d'exposition en formant une barrière aussi bien physique que visuelle dans la salle principale. Simple parallélépipède longiligne à section carrée en aggloméré, dont les panneaux sont fixés sur une structure interne en tasseaux. Le volume est à une échelle inadaptée et disproportionnée au lieu : il sature l'espace, y apparaît tellement à l'étroit que par une fenêtre de l'étage, ce qui s'apparente à une poutre démesurée sort du bâtiment. En réalité, ce qui dépasse est la première chose que l'on voit en arrivant sur le site, aiguissant ainsi dès l'extérieur la curiosité du visiteur. L'existence d'un "Encombrant" s'achève avec la fin de chaque exposition pour laquelle il a été créé, puisqu'il ne peut exister en dehors du lieu pour lequel il a été exclusivement réalisé, soulignant son caractère temporaire.

Né à Lille en 1978, Nicolas Guiot qui vit et travaille à Bruxelles est diplômé de l'École des Beaux-arts de Nantes. En 2004 il a été le lauréat du Hogher



© Galerie Valentin

Instituut voor Schone Kunsten (HISK) d'Anvers.

## Drum'n' Bass de Mathieu Mercier

L'installation se présente sous la forme d'une étagère noire, parfaitement orthonormée, portant des objets manufacturés dont les couleurs primaires vives mettent en relief une composition à la Mondrian. La référence est d'autant plus évidente que l'espace d'un instant on pense se trouver devant un tableau du maître de l'art géométrique. Les objets eux-mêmes ont volontairement une volumétrie rigoureuse. Drum'n' Bass démontre ainsi qu'une œuvre abstraite peut être, de surprenante façon, parfaitement transposée de manière figurative. Mathieu Mercier fait le chemin inverse de l'abstraction, un bon moyen de revisiter le Pop'art. Son caractère multiple est l'autre particularité de Drum'n' Bass puisque, comme les lithographies ou les gravures, l'œuvre en étant reproduite à de multiples exemplaires peut être ainsi, pour le public, disponible plus largement.

Le champ d'intervention de Mathieu Mercier peut s'inscrire entre design et

sculpture. L'intérêt pour l'objet et ses rapports avec l'architecture et le dit design demeure une constante dans son travail. Ses œuvres suggèrent l'univers domestique, l'environnement familial et familial. Il s'interroge sur la place de l'objet dans l'esthétique contemporaine et propose une vision originale du mode de vie.

Mathieu Mercier est né en 1970 à Conflans-Sainte-Honorine. Il partage son activité entre Paris et Berlin. Il a été le lauréat du Prix Marcel Duchamp 2003, prix créé en 2000 à l'initiative de collectionneurs d'art contemporain regroupés dans l'Association pour la diffusion internationale de l'Art français (ADIAF) ayant pour ambition, dans le domaine des arts plastiques, de valoriser la notoriété d'artistes résidant et travaillant en France.

Nicolas Guiot, Mathieu Mercier et les autres artistes du Syndrome de Broadway, sont imprégnés de la société de consommation. Pour preuve, la liste des matériaux utilisés tasseaux, éponges, mélaminé, contreplaqué ressemble à s'y méprendre à une liste d'achat dans un magasin de bricolage. De là à prédire que l'art va subir lui aussi, sauf à ce qu'elle s'applique implicitement déjà, la loi du marketing ? ●