

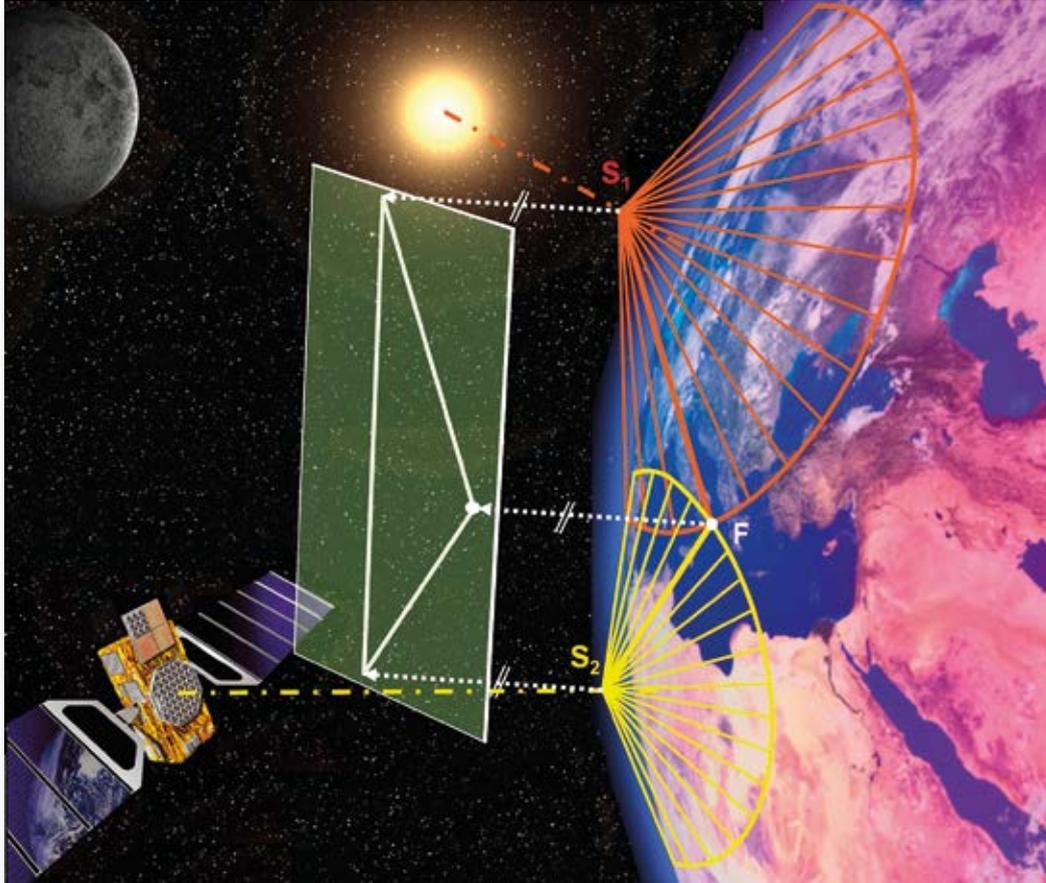
Navigation aux Astres et aux Satellites

PAR LA MÉTHODE DU PLAN DES SOMMETS

Yves Robin-Jouan

N7 Toulouse 1970, IAE Paris 1977
Membre IFN, ION Member

*Aux femmes de ma vie,
en souvenir de certains déjeuners
agrémentés de sphères, cônes et plans !*



Remerciements

à François Lachaux, professeur et chercheur en mathématiques, ami navigateur, pour sa relecture passionnée et ses conseils éclairés ;

à Navecom et à ses clients institutionnels, qui ont directement ou indirectement supporté les travaux de R & D sous-jacents ;

à l'Institut français de navigation en général, pour son accueil bienveillant ;

à Jean-Louis Guibert, *intuitu personæ*, pour son amical soutien.

Table des matières

Préface de l'IFN	8
Introduction	10
Chapitre 1	16
Raccourci historique de la Navigation et de la Mécanique Céleste	
1. Un apport considérable de l'Antiquité	18
2. Une lente macération jusqu'à la fin de l'Âge médiéval	20
3. Un nouvel essor avec les grandes découvertes	22
4. Un effort de théorisation au XVIII ^e siècle	25
5. Une mise en œuvre opérationnelle au XIX ^e siècle	27
6. L'apogée de la navigation astronomique au XX ^e siècle	30
6.1 Perfectionnement des éphémérides et des tables	30
6.2 Recherche de solutions directes au problème du point	32
6.3 Astro-navigation en aéronautique et au-delà	34
7. Le foisonnement et la sophistication de l'époque contemporaine	36
7.1 Alternatives aux satellites	36
7.2 GPS et GLONASS	37
7.3 Les systèmes successeurs du GPS	39
8. La méthode du Plan des sommets dans le panorama contemporain	40
9. Repérage méthodologique	41
10. Un exemple historique de Gauss	42
Chapitre 2	44
Principes des méthodes de navigation aux amers célestes	
1. Notations	46
2. Typologie des systèmes	47
3. Le triangle d'or en navigation	47
4. Classification des méthodes	49
5. Les techniques et l'art de l'estime	50
6. Eléments de cartographie	52
7. Identification et éphémérides	55
8. Dimensions, nature des variables et précision	57
9. Illustration des algorithmes de calcul	58
10. Limitations de la métrologie	59
11. Introduction de l'indicateur DOP	61
12. Dilution de précision en navigation satellitaire	62
13. Singularités de la multilatération satellitaire	64
14. Positionnement de la méthode du Plan des sommets	67

Chapitre 3 70

Fondements géométriques

de la méthode du Plan des sommets

1. Repères et coordonnées	72
2. Sphère de référence	74
3. Cercles d'isomesure	74
4. Introduction du Plan des sommets	76
5. Théorème 1 et réciproque	77
6. Mise en équations	78
7. Théorème 2 et réciproque	80
8. Généralisation à n observations inexactes – Théorème 3	82
9. Restriction au cas de 2 observations – Théorème 4	84
10. Cas canonique de point par 2 observations	85

Chapitre 4 88

Application de la MPS

à la navigation astronomique

1. Pondération des observations par leur hauteur – Étape de prédiction	90
2. Restriction du problème dans le Plan des sommets – Étape de correction	92
3. Conséquences et commentaires	92
4. Cas canoniques de trois observations à chapeau équilatéral	94
5. Cas canoniques à chapeau non équilatéral	96
6. Exercice reprenant le point de Costes et Bellonte	99
7. Généralisation à un chapeau quelconque	100
8. Restriction à deux observations	101
9. Cas canonique du « carré de Guinée », à quatre observations	102
10. Première approche statistique en fonction du nombre d'observations	103

Chapitre 5 106

Singularités en navigation astronomique

et traitement par la MPS

1. Approche globale du problème des singularités	108
1.1 Singularités extrinsèques	108
1.2 Singularités intrinsèques	109
2. Classification et modèles associés aux singularités astronomiques	109
2.1 Première espèce	110
2.2 Deuxième espèce	110
3. Description des singularités par la méthode du Plan des sommets	110
4. Notion de DOP astronomique	113
5. Formulation analytique du DOP astronomique	113
6. Interprétation géométrique du DOP astronomique	114
7. Interprétation géométrique des cas de singularités	115
8. Calcul analytique des DOP avec trois astres – Singularités extrinsèques	116
9. Calcul analytique du HDOP avec n astres – Singularités intrinsèques	117
10. Traitement des dégénérescences par la méthode du Plan des sommets	120
11. Exercice sur un cas test proche d'une singularité de 1 ^{re} espèce	122
12. Exercice sur un cas test de circumzénithales	123

Chapitre 6 124

Informatisation de la MPS

Logiciels à l'usage des navigateurs

1. Principes et environnement de programmation	126
1.1 Critères du groupe a	126
1.2 Critères du groupe b	127
2. Présentation d'ASTROLAB	128
3. Ephémérides intégrées	129
4. Corrections des observations	131
5. Calcul du point par ASTROLAB	132
6. Tableaux édités par ASTROLAB dans un exemple	132
7. Versions du logiciel ASTROLAB	135
8. Note à propos d'Almicantarar	137
9. Aperçu de la programmation de la MPS pour satellite	138
9.1 Généralités	138
9.2 Coeur du programme de calcul MPS-SAT	139

Chapitre 7 142

Application de la méthode MPS

à la navigation par satellite

1. Reprise de la formulation	144
2. Ellipsoïde de référence WGS84	145
3. Résolution par un algorithme de relaxation	147
4. Cadrage et initialisation des variables	149
5. Résolution par un algorithme d'incréméntation	151
6. Application à un cas canonique déduit de Costes et Bellonte	153
7. Impact d'une erreur systématique sur les données	158
8. Problème à solutions multiples et problème du point incomplet	159

Chapitre 8 162

Traitement par la MPS d'exemples

de navigation pris dans la littérature

1. Remarques communes aux exercices de point astronomique	164
2. Exercice de point astronomique à deux observations par Bodenez	164
3. Exercice de point astronomique à deux observations par Ruiz	165
4. Exercice de point astronomique à trois observations par Stern-Veyrin	166
5. Exercice de point astronomique à trois étoiles par Asken	167
6. Exercice de point astronomique à trois observations transportées par Botrel	168
7. Exercice de point astronomique à deux planètes et deux étoiles par Bennett	169
8. Exercice de point à trois étoiles en approche directe par Bourbon	170
9. Remarques communes aux exercices de multilatération par satellites	171
10. Exercice de multilatération à quatre satellites par Burnside et Dana	171
11. Exercice de multilatération à quatre satellites par Awange et Grafarend	173
12. Exercice de multilatération à six satellites par Strang et Borre	174
13. Exercice de multilatération à huit satellites par Choi et Cicci	175
14. Conclusion du chapitre	177

Chapitre 9 178

Hybridation native

et autres perspectives

1. Hybridation au sens large	180
2. Navigation hybride et coopérative pour la route intelligente	182
3. Besoin d'hybridation pour les mobiles maritimes	184
4. Principes de l'hybridation native des données brutes satellitaires et astronomiques	187
5. Application au problème minimal d'un astre et de deux satellites	189
5.1 Analyse restreinte dans le plan diamétral des deux satellites	190
5.2 Retour au problème 3D	194
5.3 Algorithmes de résolution en 3D	196
6. Cas canonique déduit de Costes et Bellonte	197
7. Autres perspectives d'évolution de la méthode	199

Conclusion 202

Annexe 1 208

Quelques compléments

de mathématiques

1. Moindres carrés et matrice pseudo-inverse	210
2. Méthode de Bancroft pour la navigation par satellite	211
3. Notions sur le filtrage de Kalman	213

Annexe 2 216

Bibliographie

1. Catégorie H (Historique)	218
2. Catégorie N (Navigation)	225
3. Catégorie S (Plan des Sommets)	227
4. Catégorie G (GPS et GNSS)	230
5. Catégorie I (programmation Informatique)	231
6. Catégorie P (Pratique)	233
7. Catégorie Y (hYbridation)	235

Annexe 3 240

Notice technique du logiciel ASTROLAB v3

1. Généralités	242
2. Programme RECOEFM5	243
3. Programme FOBSRID3	245
4. Programme FOBSEDI2	245
5. Programme PTPLSOM5	246
6. Cas tests	247
7. Avertissements	248
8. Références applicables au fichier de test	249

Annexe 4 250

Le Monologue du navigateur

Jour 1	252
Jour 2	253
Jour 3	254

Préface de l'Institut français de navigation

*« Étonnants voyageurs ! Quelles nobles histoires
nous lisons dans vos yeux profonds comme les mers !
[...] Au fond de l'inconnu pour trouver du nouveau. »*

Baudelaire

La méthode du Plan des sommets constitue une autre manière de se positionner, de faire le « point ».

C'est une méthode directe, indépendante de tout point, fût-il estimé ou arbitraire. Elle est fondée sur des propriétés géométriques simples et fait beaucoup appel à l'algèbre linéaire, en marginalisant les traitements non-linéaires. Autorisant de nombreuses observations, elle permet ainsi de traiter l'erreur.

Initiée par l'auteur dans les années quatre-vingt-dix à partir de l'utilisation des satellites, cette méthode s'applique aussi à la navigation astronomique. Pour cette application, c'est la revue *Navigation* de l'IFN qui a publié les premiers articles. Certains éléments en sont repris puis largement développés dans cet ouvrage.

Ainsi, la navigation astronomique « automatisée » pourrait assumer la redondance de la navigation par satellite, actuellement prévue être assurée par un autre GNSS, dans les règles de la convention Safety of life at sea (SOLAS) de l'Organisation maritime internationale (OMI).

Mieux, on pourrait hybrider les deux « systèmes », ainsi qu'il avait été envisagé de faire, il fut un temps, pour le GPS et le LORAN-C, notamment. Avec la méthode du Plan des sommets, ce travail a été abordé en 2006.

Enfin, on répondrait ainsi aux préoccupations de l'OMI et plus précisément aux préceptes de sa convention Seafarers training, certification and watchkeeping (STCW). Cette convention exige en effet des navigateurs hauturiers qu'ils connaissent la navigation électronique, mais également la navigation astronomique.

Ceci dit, quelle est la démarche de l'auteur ? Elle est méthodique, il va de soi.

- Tout d'abord quelques rappels indispensables :
Un historique de la navigation : l'Antiquité grecque, les grands voyages, les grandes découvertes, Copernic et Kepler, la longitude par l'heure, la trigonométrie sphérique et les tables de calcul, les navigations hyperbolique, inertielle et par satellite.
- Les principes des méthodes de navigation aux « amers célestes » où l'on retrouve les fondamentaux tels l'estime, la cartographie – ENC, ECDIS – les algorithmes et l'automatisation du « triangle d'or » à savoir :
 - identification et éphémérides ;
 - observations ou mesures ;
 - calculs (électronique ou tables).
- Puis, le vif du sujet :
 - Les fondements géométriques de la méthode du Plan des sommets : formulation du lieu des points liés à une observation, conjugaison polaire ;
 - La mise en équations de la méthode dans le cadre de la navigation astronomique : prédiction et correction, avec en parallèle estimation de l'erreur ;
 - L'intégration des traitements adéquats contre les singularités, avec changement de modèles piloté par indicateurs ;
 - L'application à la navigation astronomique – Présentation de logiciels ;
 - L'application à la navigation par satellite : paramétrage en altitude et itération, convergence, programmation ;
 - Des exemples concrets, permettant la confrontation avec d'autres méthodes ;
 - Les perspectives de développement autour de l'hybridation.
- Enfin, la conclusion dans laquelle force sera pour le lecteur d'admettre que la méthode du Plan des sommets, contrairement à celles que nous appellerons « méthodes différentielles » en regroupant « droites de hauteur » dans le plan et linéarisation dans l'espace, est à la fois universelle, autonome, globale, directe et sûre.

Suivent plusieurs annexes, dont la liste des références bibliographiques, particulièrement intéressante et conséquente.

En bref, un ouvrage innovant, conciliant ce que d'aucuns considéraient à tort comme dépassé, à savoir la navigation astronomique, avec la navigation par satellite, que l'on ne saurait suivre aveuglément, en automatisant paramètres, calculs, corrections, de manière à faciliter la tâche du navigateur, tout en rendant la navigation plus sûre, conformément, là encore, aux vœux de l'OMI.

Jean-Louis GUIBERT
Secrétaire général de l'Institut français de navigation