

République Tunisienne

Université El Manar

Ecole Supérieure Privée de l'Aéronautique et des Technologies de  
Tunis

---

**Cours de Géodésie pour les Elèves  
Ingénieurs**

-

**de l'Option Géomatique**

---

**Abdelmajid Ben Hadj Salem**

**Ingénieur Géographe Général**

Ancien Ingénieur à l'Office de la Topographie et du Cadastre (OTC)

Version 2 - Septembre 2017

*Cours de Géodésie pour les  
Elèves Ingénieurs*

-

*de l'Option Géomatique*

Par Abdelmajid BEN HADJ SALEM

Ingénieur Général Géographe  
Ancien Ingénieur à l'Office de la Topographie et  
du Cadastre (OTC)

**Abdelmajid BEN HADJ SALEM**

e-mail : abenhadsalem@gmail.com

*O my Lord! Increase me further  
in knowledge.*

*(Holy Quran, Surah Ta Ha, 20 :114.)*



# *Préface*

Ce cours d'introduction à la géodésie est destiné à la formation d'ingénieurs en sciences géographiques en particulier les élèves ingénieurs de l'option topographie et géomatique de l'Ecole Supérieure Privée d'Aéronautique et des Technologies de Tunis.

Après un chapitre d'introduction, ce cours est organisé comme suit :

- le deuxième chapitre concerne les principales formules de la trigonométrie sphérique ;
- le troisième chapitre présente les différents éléments de l'astronomie de position liés à la géodésie et en particulier les différents systèmes de coordonnées utilisés en astronomie de position ;
- le quatrième chapitre est un rappel de la géométrie des courbes, le repère de Frenêt, la théorie des surfaces, la première forme fondamentale, et les théorèmes liés aux rayons principaux de courbure d'une surface de  $\mathbb{R}^3$  ;
- la géométrie de l'ellipse et de l'ellipsoïde est l'objet du cinquième chapitre où on définit les formules des coordonnées tridimensionnelles d'un point, relatives à un ellipsoïde donné. On traite aussi les lignes géodésiques de l'ellipsoïde en présentant une méthode itérative de l'intégration de leurs équations ;
- dans le sixième chapitre, on donne les définitions des systèmes et des coordonnées géodésiques ainsi que du géoïde . On présente aussi les principaux systèmes géodésiques des pays de l'Afrique du Nord ;
- le septième chapitre traite les réseaux géodésiques terrestres et spatiaux. On présente leurs conceptions et réalisations. De même, les opérations de densifi-

cation des réseaux terrestres et spatiaux par la technologie GPS sont traitées en donnant les principales phases ;

- quant au huitième chapitre, il est consacré aux différentes corrections apportées aux distances observées lors de leurs réductions à la surface de l'ellipsoïde de référence et aux plans des représentations planes utilisées ;

- le datum altimétrique ainsi que les différentes définitions des systèmes d'altitudes font l'objet du neuvième chapitre du cours.

- des éléments historiques de la géodésie tunisienne sont présentés dans le dixième chapitre. On parlera des différents systèmes géodésiques tunisiens avant l'établissement du système NTT (Nouvelle Triangulation Tunisienne) le système géodésique terrestre officiel de la Tunisie. Ce chapitre n'a pas l'intention en tout cas de décrire l'histoire de la géodésie tunisienne depuis les premiers travaux de rattachement des points géodésiques tunisiens à la géodésie italienne (*C. Fezzani, 1979*) ;

- l'onzième chapitre est l'un des chapitres importants de ce cours où on traite les représentations planes et principalement celles qui sont conformes. Dans ce chapitre, on donne une démonstration de la condition de conformité d'une représentation plane. On présente aussi ce qu'on appelle en langage mathématique les représentations quasi-conformes en présentant un exemple ;

- les chapitres douzième et treizième sont consacrés respectivement à étudier en détail les représentations planes Lambert et l'UTM en démontrant pour chacune, les différentes formules des expressions des coordonnées rectangulaires  $(X, Y)$  et du module linéaire ;

- parmi les modèles de passage entre les systèmes géodésiques, on traite en détail, dans le quatorzième chapitre, les modèles tridimensionnels de Burša-Wolf, de Molodensky et le modèle bidimensionnel de Helmert. On présente une méthode de détermination directe des paramètres du modèle de Burša-Wolf ;

- dans le quinzième chapitre, on présente des notions sur le mouvement d'un satellite artificiel autour de la Terre avant d'entamer le positionnement par les satellites GPS objet du seizième chapitre ;

- la bibliographie est l'objet du dix-septième chapitre.

# Table des matières

Préface .....	vii
<b>1</b> <i>Introduction</i> .....	1
1.1 DÉFINITIONS DE LA GÉODÉSIE .....	1
<b>2</b> <i>La Trigonométrie Sphérique</i> .....	5
2.1 LE TRIANGLE SPHÉRIQUE .....	5
2.2 LE TRIÈDRE SUPPLÉMENTAIRE - LE TRIANGLE SPHÉRIQUE POLAIRE .....	6
2.3 LES FORMULES DE LA TRIGONOMÉTRIE SPHÉRIQUE .....	7
2.4 L'EXCÈS SPHÉRIQUE .....	10
2.5 EXERCICES ET PROBLÈMES .....	11
<b>3</b> <i>Notions d'Astronomie de Position</i> .....	15
3.1 RAPPELS HISTORIQUES .....	15
3.2 OBJECTIFS DE L'ASTRONOMIE .....	16
3.3 LES SYSTÈMES DE RÉFÉRENCE .....	17
3.4 NOTIONS D'ASTRONOMIE DE POSITION .....	18
3.5 EXERCICES ET PROBLÈMES .....	29

<b>4</b>	<b><i>Courbes et Surfaces</i></b> .....	33
4.1	COURBES PLANES - COURBURE.....	33
4.2	COURBES GAUCHES .....	35
4.3	SURFACES .....	38
4.4	LA PREMIÈRE FORME FONDAMENTALE .....	39
4.5	LA DEUXIÈME FORME FONDAMENTALE.....	43
4.6	EXERCICES ET PROBLÈMES .....	50
<b>5</b>	<b><i>Géométrie de l'Ellipse et de l'Ellipsoïde</i></b> .....	59
5.1	GÉOMÉTRIE DE L'ELLIPSE .....	59
5.2	EQUATIONS PARAMÉTRIQUES DE L'ELLIPSE .....	61
5.3	CALCUL DE LA GRANDE NORMALE .....	64
5.4	GÉOMÉTRIE DE L'ELLIPSOÏDE DE RÉVOLUTION.....	66
5.5	CALCUL DES LIGNES GÉODÉSQUES DE L'ELLIPSOÏDE DE RÉVOLUTION .....	69
5.6	APPLICATIONS AUX PROBLÈMES DIRECT ET INVERSE DU CALCUL DES LIGNES GÉODÉSQUES .....	78
5.7	EXERCICES ET PROBLÈMES .....	83
<b>6</b>	<b><i>Les Systèmes Géodésiques</i></b> .....	89
6.1	DÉFINITION D'UN SYSTÈME GÉODÉSIQUE.....	89
6.2	LE GÉOÏDE .....	92
6.3	LES SYSTÈMES DE COORDONNÉES .....	98
6.4	LES SYSTÈMES GÉODÉSQUES EN AFRIQUE DU NORD .....	100
6.5	CARACTÉRISTIQUES DES ELLIPSOÏDES GÉODÉSQUES .....	102
6.6	EXERCICES ET PROBLÈMES .....	103

---

<b>7</b>	<b><i>Les Réseaux Géodésiques</i></b> .....	107
7.1	INTRODUCTION .....	107
7.2	LES RÉSEAUX GÉODÉSQUES CLASSIQUES .....	108
7.3	LA GÉODÉSIE SPATIALE .....	110
7.4	DENSIFICATION DU RÉSEAU GÉODÉSIQUE GPS DE BASE .....	114
7.5	LA DENSIFICATION D'UN RÉSEAU GÉODÉSIQUE TERRESTRE .....	115
7.6	EXERCICES ET PROBLÈMES .....	116
<b>8</b>	<b><i>Réduction des Distances</i></b> .....	117
8.1	INTRODUCTION .....	117
8.2	CORRECTIONS DES DISTANCES .....	117
8.3	FORMULE RIGOUREUSE DE PASSAGE DE $D_P$ À $D_0$ .....	122
8.4	EXERCICES ET PROBLÈMES .....	122
<b>9</b>	<b><i>Les Systèmes des Altitudes</i></b> .....	125
9.1	LES SYSTÈMES D'ALTITUDES .....	125
<b>10</b>	<b><i>La Géodésie Tunisienne</i></b> .....	129
10.1	INTRODUCTION .....	129
10.2	HISTORIQUE .....	131
10.3	LES SYSTÈMES GÉODÉSQUES EN TUNISIE .....	131
10.4	LES REPRÉSENTATIONS PLANES .....	134
10.5	POURQUOI UN NOUVEAU SYSTÈME GÉODÉSIQUE ? .....	139
10.6	LES TRAVAUX DE MODERNISATION DES RÉSEAUX GÉODÉSQUES TUNISIENS .....	140
10.7	LA MISE À NIVEAU DE LA GÉODÉSIE TUNISIENNE .....	144
10.8	L'ARRÊTÉ DU 10 FÉVRIER 2009 .....	148
10.9	CONCLUSIONS .....	150

<b>11</b>	<b><i>Les Représentations Planes</i></b> .....	151
11.1	INTRODUCTION .....	151
11.2	ELÉMENTS CORRESPONDANTS .....	152
11.3	CANEVAS .....	153
11.4	LES REPRÉSENTATIONS CYLINDRIQUES .....	155
11.5	LES REPRÉSENTATIONS CONIQUES ET AZIMUTALES .....	155
11.6	LES ALTÉRATIONS .....	156
11.7	INDICATRICE DE TISSOT .....	158
11.8	LES REPRÉSENTATIONS PLANES ET LES FONCTIONS ANALYTIQUES .....	161
11.9	LES REPRÉSENTATIONS OU TRANSFORMATIONS QUASI- CONFORMES .....	172
11.10	EXERCICES ET PROBLÈMES .....	178
<b>12</b>	<b><i>La Représentation Plane Lambert</i></b> .....	187
12.1	DÉFINITION ET PROPRIÉTÉS .....	187
12.2	INDICATRICE DE TISSOT .....	189
12.3	CALCUL DES MODULES PRINCIPAUX .....	189
12.4	ÉTABLISSEMENT DES FORMULES $R(\varphi)$ ET $\Omega(\lambda)$ .....	190
12.5	DÉTERMINATION DES CONSTANTES $R_0$ ET $n$ .....	191
12.6	EXPRESSION DES COORDONNÉES CARTÉSIENNES .....	193
12.7	PASSAGE DES COORDONNÉES $(R, \Omega)$ AUX COORDONNÉES $(x, y)$ .....	194
12.8	PASSAGE DES COORDONNÉES $(x, y)$ AUX COORDONNÉES $(R, \Omega)$ .....	195
12.9	ÉTUDE DE L'ALTÉRATION LINÉAIRE .....	196
12.10	CONVERGENCE DES MÉRIDIENS .....	198
12.11	CALCUL DE LA RÉDUCTION DE LA CORDE .....	199
12.12	EXERCICES ET PROBLÈMES .....	200

---

<b>13</b>	<b><i>La Représentation Plane UTM</i></b> .....	203
13.1	DÉFINITION ET PROPRIÉTÉS .....	203
13.2	DÉTERMINATION DES COORDONNÉES UTM .....	204
13.3	ANNEXE : CALCUL DE LA LONGUEUR D'UN ARC DE LA MÉRIDIENNE D'UN ELLIPSOÏDE DE RÉVOLUTION .....	212
13.4	EXERCICES ET PROBLÈMES .....	214
<b>14</b>	<b><i>Les Transformations Entre Les Systèmes Géodésiques</i></b> .....	217
14.1	INTRODUCTION .....	217
14.2	LE MODÈLE DE BURSA - WOLF .....	218
14.3	LES FORMULES DE MOLODENSKY .....	223
14.4	LES FORMULES DE MOLODENSKY STANDARD .....	226
14.5	LES FORMULES DE MOLODENSKY ABRÉGÉES .....	226
14.6	LA RECHERCHE DES PARAMÈTRES DE PASSAGE PAR LES FORMULES DE MOLODENSKY .....	227
14.7	LA DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES DU MODÈLE DE BURŠA-WOLF .....	228
14.8	LA TRANSFORMATION DE HELMERT BIDIMENSIONNELLE ...	231
14.9	EXERCICES ET PROBLÈMES .....	236
<b>15</b>	<b><i>Notions sur le Mouvement d'un Satellite Artificiel de la Terre</i></b> .....	239
15.1	LES EQUATIONS DU MOUVEMENT .....	239
15.2	ÉLÉMENTS DE L'ORBITE .....	244
15.3	LES PERTURBATIONS DES ORBITES .....	250
15.4	L'INFLUENCE DU CHAMP DE LA PESANTEUR SUR LE MOUVEMENT DU SATELLITE ARTIFICIEL .....	252
15.5	EXERCICES ET PROBLÈMES .....	254

---

<b>16</b>	<b><i>Le Système GPS</i></b> .....	259
16.1	INTRODUCTION .....	259
16.2	ASPECTS GÉNÉRAUX .....	260
16.3	LES INSTRUMENTS DE MESURES GPS .....	262
16.4	PRINCIPES DE MESURES GPS.....	263
16.5	LES EQUATIONS FONDAMENTALES D'OBSERVATIONS .....	264
16.6	LES DIFFÉRENTS TYPES DE POSITIONNEMENT PAR GPS .....	271
16.7	LES APPLICATIONS DU GPS .....	276
16.8	ALMANACH .....	277
<b>17</b>	<b><i>Bibliographie</i></b> .....	279
	<b>Liste des Figures</b> .....	283
	Liste des Figures .....	283
	Liste des Tables .....	285
	<b>Index</b> .....	289

# Chapitre 1

## *Introduction*

” Consciente des résultats extraordinaires obtenus par les institutions cartographiques nationales et les agences spatiales, les commissions géodésiques, les instituts de recherche et les universités, et d’autres organisations internationales comme la Fédération internationale des géomètres, en faisant fond sur les initiatives de l’Association internationale de géodésie, qui représente la communauté géodésique mondiale, pour ce qui est d’évaluer et de suivre au mieux les changements du système terrestre, notamment la mise au point du Repère de référence terrestre international, qui a été adopté...”

1

### 1.1 Définitions de la Géodésie

Suivant l’étymologie grecque, le mot géodésie veut dire divise la Terre. Le grand géodésien Allemand **F.R. Helmert** (*F.R. Helmert*, 1884)<sup>2</sup> définissait la Géodésie comme suit " *la Géodésie est la science de la mesure et de la représentation de la surface terrestre*".

---

1. Extrait de la Résolution A/RES/69/266, du Repère de référence géodésique mondial pour le développement durable, adoptée par l’Assemblée Générale des Nations-Unis le 26 février 2015(UN-GGIM, 2015).

2. **Friedrich Robert Helmert** (1843-1917) : géodésien allemand.

1

Une définition contemporaine de la Géodésie est donnée par le Comité Associé Canadien de Géodésie et de Géophysique (C.A.C.G.G.,1973) à savoir : *la Géodésie est la discipline qui concerne la mesure et la représentation de la Terre, incluant son champ de gravité, dans un espace tridimensionnel variant avec le temps.*

Une autre définition récente (2002) est :” *Geodesy is an interdisciplinary science which uses spaceborne and airborne remotely sensed, and ground-based measurements to study the shape and size of the Earth, the planets and their satellites, and their changes; to precisely determine position and velocity of points or objects at the surface or orbiting the planet, within a realized terrestrial reference system, and to apply these knowledge to a variety of scientific and engineering applications, using mathematics, physics, astronomy, and computer science.*”(M. Lemmens, 2011).

La Géodésie a ainsi deux aspects :

\* un aspect scientifique et de recherches :

- la mesure des dimensions de la Terre et la détermination de sa forme géométrique.

\* un aspect pratique :

- l'établissement et la maintenance des réseaux géodésiques tridimensionnels nationaux et globaux et en tenant compte des variations de ces réseaux en fonction du temps ;

- la mesure et la représentation des phénomènes géodynamiques comme le mouvement des pôles, les marées terrestres et le mouvement de la croûte terrestre.

Dans cette première partie du livre, on s'intéresse aux réseaux géodésiques et à leurs établissements.

Un **réseau géodésique** est un ensemble de points dont les coordonnées sont connues avec précision dans un système de référence donné. Ces points vont servir par la suite comme points de référence pour tous les travaux topographiques et cartographiques.

Cette première partie de l'ouvrage comprendra en plus de l'introduction les chapitres suivants :

2. la trigonométrie sphérique ;

3. notions d'astronomie de position ;

- 
4. courbes et surfaces ;
  5. géométrie de l'ellipse et de l'ellipsoïde ;
  6. les systèmes géodésiques ;
  7. les réseaux géodésiques ;
  8. réduction des distances ;
  9. les systèmes d'altitudes ;
  10. la géodésie tunisienne ;
  11. les représentations planes ;
  12. la représentation Lambert Tunisie ;
  13. la représentation UTM ;
  14. les transformations entre les systèmes géodésiques ;
  15. notions sur le mouvement d'un satellite artificiel autour de la Terre ;
  16. le système GPS ;
  17. la bibliographie.



# Chapitre 2

## *La Trigonométrie Sphérique*

La trigonométrie sphérique établit les relations liant les grandeurs caractéristiques d'un triangle sphérique.

### 2.1 Le Triangle Sphérique

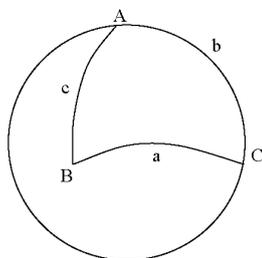
On considère une sphère de centre un point  $O$  et de rayon l'unité et trois points sur la sphère  $A, B$ , et  $C$ .

**Définition 2.1** *On appelle triangle sphérique la figure formée par les 3 arcs de grands cercles  $AB, AC$ , et  $CB$  inférieurs à 200 grades (**Fig. 2.1**).*

Les grandeurs qui caractérisent le triangle sphérique  $ABC$  sont :

- les 3 côtés notés respectivement  $a, b, c$ , équivalents aux angles au centre des directions  $OA, OB, OC$  soit  $a = (\widehat{OB, OC}), b = (\widehat{OA, OC}), c = (\widehat{OA, OB})$ .
- les 3 angles dièdres des faces du trièdre  $OA, OB, OC$  notés  $A, B, C$ .

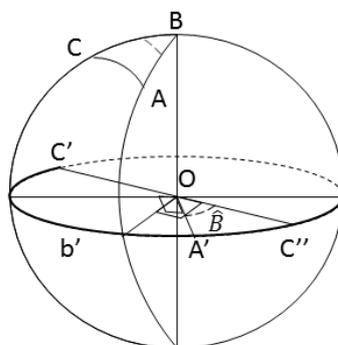
On remarque que les angles et côtés du triangle sont des grandeurs mesurables par des angles.



**Fig. 2.1** Le triangle sphérique

## 2.2 Le Trièdre Supplémentaire - Le Triangle Sphérique Polaire

Au trièdre  $OA, OB, OC$  on associe le trièdre supplémentaire dont les arrêtes  $OA', OB', OC'$  sont respectivement orthogonales aux faces  $OBC, OAC, OAB$ . Le point  $A'$  est choisi tel que  $A$  et  $A'$  soient dans la même demie sphère limitée par  $BC$ . Soit le point  $C''$  diamétralement opposé au point  $C'$  (**Fig. 2.2**). On a donc :



**Fig. 2.2** Le triangle sphérique polaire

$$(\widehat{OA, OC''}) = \pi - (\widehat{OBC, OAB}) = \pi - B = (\widehat{OA', OC'})$$

D'où les relations :

$$\begin{aligned}(\widehat{OB'}, \widehat{OC'}) &= a' = \pi - A \\(\widehat{OA'}, \widehat{OC'}) &= b' = \pi - B \\(\widehat{OA'}, \widehat{OB'}) &= c' = \pi - C\end{aligned}$$

**Définition 2.2** *Le triangle sphérique  $A', B', C'$  est dit triangle polaire du triangle  $ABC$ .*

Comme le triangle  $ABC$  est le triangle polaire de  $A'B'C'$ , on a :

$$\begin{aligned}a &= \pi - A' \\b &= \pi - B' \\c &= \pi - C'\end{aligned}$$

## 2.3 Les Formules de la Trigonométrie Sphérique

Un triangle sphérique est entièrement défini par la donnée de 3 de ses 6 éléments. Alors entre 4 éléments quelconques, il y a :

$$C_6^4 = \frac{6!}{4!2!} = 15$$

relations non indépendantes comme suit :

- 3 côtés, 1 angle : 3 relations ;
- 3 angles, 1 côté : 3 relations ;
- 2 côtés, 2 angles (opposés aux côtés) : 3 relations ;
- 2 côtés, 2 angles (adjacents aux côtés) : 6 relations.

### 2.3.1. Etablissement de la Formule Fondamentale

Soit un triangle sphérique  $ABC$ , en calculant le produit scalaire  $\mathbf{OB} \cdot \mathbf{OC}$  de 2 manières (**Fig. 2.3**), on arrive à la formule fondamentale :

$$\begin{aligned}\mathbf{OB} &= \cos(\pi/2 - c) \cdot \mathbf{OH} + \sin(\pi/2 - c) \cdot \mathbf{OA} = \operatorname{sinc} \cdot \mathbf{OH} + \operatorname{cosc} \cdot \mathbf{OA} \\ \mathbf{OC} &= \operatorname{sinb} \cdot \mathbf{OK} + \operatorname{cosb} \cdot \mathbf{OA}\end{aligned}$$

D'où :

$$\mathbf{OB} \cdot \mathbf{OC} = \sin c \cdot \sin b \cdot \mathbf{OH} \cdot \mathbf{OK} + \cos b \cdot \cos c$$

Or :

$$\mathbf{OH} \cdot \mathbf{OK} = \|\mathbf{OH}\| \cdot \|\mathbf{OK}\| \cdot \cos(\mathbf{OH}, \mathbf{OK}) = 1 \cdot 1 \cdot \cos A = \cos A$$

Et :

$$\mathbf{OB} \cdot \mathbf{OC} = \|\mathbf{OB}\| \cdot \|\mathbf{OC}\| \cdot \cos(\mathbf{OB}, \mathbf{OC}) = 1 \cdot 1 \cdot \cos a = \cos a$$

D'où :

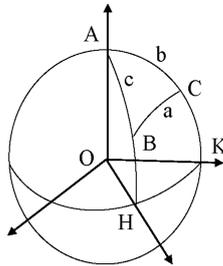
$$\boxed{\cos a = \cos b \cdot \cos c + \sin b \cdot \sin c \cdot \cos A} \quad (2.1)$$

En utilisant le triangle polaire, on a :

$$\cos a' = \cos b' \cdot \cos c' + \sin b' \cdot \sin c' \cdot \cos A'$$

Or  $a' = \pi - A$ ,  $b' = \pi - B$ , et  $c' = \pi - C$ ,  $a = \pi - A'$ , d'où :

$$\boxed{\cos A = -\cos B \cdot \cos C + \sin B \cdot \sin C \cdot \cos a} \quad (2.2)$$



**Fig. 2.3** Calcul de la formule fondamentale

### 2.3.2. La Formule des Sinus

De (2.1), on a :

$$\cos A = \frac{\cos a - \cos b \cos c}{\sin b \sin c}$$

Soit  $\sin^2 A = 1 - \cos^2 A$ , on arrive à :

$$\frac{\sin^2 A}{\sin^2 a} = \frac{\sin^2 B}{\sin^2 b} = \frac{\sin^2 C}{\sin^2 c}$$

D'où :

$$\boxed{\frac{\sin A}{\sin a} = \frac{\sin B}{\sin b} = \frac{\sin C}{\sin c}} \quad (2.3)$$

### 2.3.3. Formules des Sinus Cosinus

En utilisant la formule fondamentale, on a :

$$\begin{aligned} \cos a &= \cos b \cdot \cos c + \sin b \cdot \sin c \cdot \cos A \\ \cos b &= \cos a \cdot \cos c + \sin a \cdot \sin c \cdot \cos B \end{aligned}$$

Et en remplaçant dans la deuxième formule, l'expression de  $\cos a$ , on obtient  $\sin c \cdot \cos b = \sin b \cdot \cos c \cdot \cos A + \sin a \cdot \cos B$ , d'où :

$$\boxed{\sin a \cdot \cos B = \cos b \cdot \sin c - \cos c \cdot \sin b \cdot \cos A} \quad (2.4)$$

### 2.3.4. Formule des Cotangentes

En remplaçant dans (2.4)  $\sin a$  par  $\sin A \cdot \sin b / \sin B$ , on obtient :

$$\boxed{\sin A \cdot \cot B = \cot b \cdot \sin c - \cos c \cdot \cos A} \quad (2.5)$$

### 2.3.5. Cas d'un Triangle Rectangle

Pour un triangle sphérique rectangle, un des angles vaut  $\pi/2 = 100\text{ gr} = 90^\circ$ . Les formules se simplifient, leur nombre est :

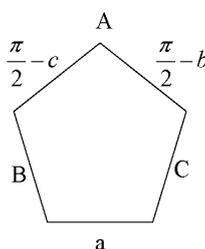
$$C_5^3 = \frac{5!}{3!2!} = 10$$

Supposons que  $A = \pi/2$ , on fait le schéma ci-dessous (**Fig. 2.4**).

On trouve les relations en appliquant la règle mnémonique de Nepier<sup>1</sup> :

*Le cosinus d'un élément quelconque est égal à :*

- au produit des cotangentes des éléments adjacents ;
- au produit des sinus des éléments non adjacents.



**Fig. 2.4** La règle de Nepier

Exemple :

- $\cos a = \cotg B \cdot \cotg C$ ,
- $\cos a = \sin(\pi/2 - c) \cdot \sin(\pi/2 - b) = \cos c \cdot \cos b$ .

## 2.4 L'Excès Sphérique

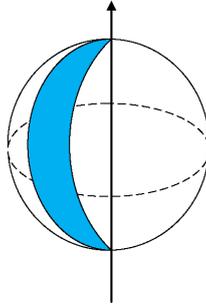
**Définition 2.3** On appelle fuseau sphérique la portion de la demi sphère limitée entre deux grands cercles (**Fig. 2.5**).

La surface d'un fuseau sphérique d'un angle  $A$  est proportionnelle à  $AR^2$  où  $R$  est le rayon de la sphère, soit  $S = kAR^2$ , pour  $A = 2\pi$  on a  $S = 4\pi R^2 = k2\pi R^2$  d'où  $k = 2$ , on obtient :

$$S = 2AR^2$$

On considère maintenant un triangle sphérique ABC :

1. **John Nepier** (1550 -1617) : mathématicien écossais.



**Fig. 2.5** Un fuseau sphérique

- le fuseau  $(AB, AC)$  donne  $S_1 = 2AR^2$  ;
- le fuseau  $(CA, CB)$  donne  $S_2 = 2CR^2$  ;
- le fuseau  $(BC, BA)$  donne  $S_3 = 2BR^2$  ;

d'où :

$$S_1 + S_2 + S_3 = 2R^2(A + B + C)$$

Or  $S_1 + S_2 + S_3$  = la surface de la demi-sphère + 2 fois la surface du triangle sphérique  $ABC$ . On note  $T$  la surface du triangle sphérique  $ABC$ , on a alors :

$$2R^2(A + B + C) = 2\pi R^2 + 2T$$

ou encore :

$$A + B + C = \pi + \frac{T}{R^2} = \pi + \epsilon$$

Soit :

$$\boxed{\epsilon(rd) = \frac{T}{R^2} = \frac{\text{Aire } ABC}{R^2} = \text{excès sphérique}} \quad (2.6)$$

## 2.5 Exercices et Problèmes

**Exercice 2.1** Calculer l'azimut d'une étoile de déclinaison  $\delta = +5^\circ$  quand sa distance zénithale est de  $80^\circ$  pour un observateur situé à la latitude  $\varphi = 56^\circ$ .

**Exercice 2.2** En appliquant au triangle de position les formules de trigonométrie sphérique montrer que l'on peut calculer l'angle horaire  $AH_c$  du coucher d'un astre par :  $\cos AH_c = -\operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{tg}\delta$ .

**Exercice 2.3** Soit un triangle sphérique  $ABC$ . On donne les éléments suivants :

- $\hat{A} = 80.16433 \text{ gr}$  ;
- $\hat{B} = 55.77351 \text{ gr}$  ;
- $\hat{C} = 64.06261 \text{ gr}$  ;
- $AC = 20.1357 \text{ km}$  ;
- $AB = 22.1435 \text{ km}$ .

1. Calculer  $\alpha = \hat{A} + \hat{B} + \hat{C}$ .
2. Déterminer  $\epsilon$  l'excès sphérique de ce triangle.
3. Calculer la fermeture du triangle  $ABC$ , donnée par :

$$f = \alpha - 200.00000 \text{ gr} - \epsilon$$

**Exercice 2.4** Soit  $(S^2)$  une sphère de rayon égal à 1. Soit un carré sphérique  $ABCD$  de côté  $a$  (arc de grand cercle). On note  $\alpha = \hat{A} = \hat{B} = \hat{C} = \hat{D}$ .

1. Montrer que :

$$\operatorname{cosa} = \operatorname{cotg}^2 \frac{\alpha}{2}$$

2. Donner l'expression de la diagonale  $d = l'$ arc  $AC$ .

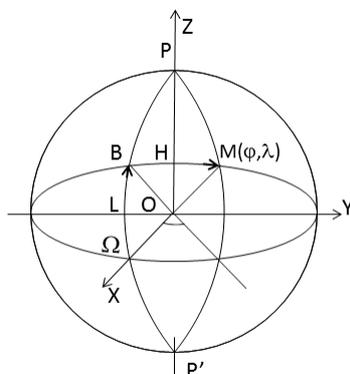
**Problème 2.1** Soit  $(S^2)$  une sphère de rayon égal à 1 et de centre le point  $O$ . Un point  $M$  de  $(S^2)$  a pour coordonnées  $(\varphi, \lambda)$ . On appelle les coordonnées de Cassini-Soldner<sup>2 3</sup> de  $M$  les angles (**Fig. 2.6**) :

- $L = \widehat{O\Omega, OB} = \operatorname{Arc} \Omega B$  ;
- $H = \widehat{OB, OM} = \operatorname{Arc} BM$ .

1. Déterminer les relations liant  $L, H$  à  $\varphi, \lambda$ .
2. Inversement, donner les relations liant  $\varphi, \lambda$  à  $L, H$ .

2. César-François Cassini (1714-1784) : astronome et géodésien français.

3. Dr Johann Georg von Soldner (1776-1833) : mathématicien et astronome bavarois.



**Fig. 2.6** Les coordonnées de Cassini-Soldner

**Problème 2.2** Au lieu  $M$  de latitude  $\varphi = 38^\circ$  Nord, on observe l'étoile polaire  $A$  de déclinaison  $\delta = +89^\circ$  et d'ascension droite  $\alpha = +2h13mn52.90s$ .

1. Donner sur un graphique, les éléments du triangle sphérique  $PAM$  où  $P$  est le pôle Nord.
2. Sachant que l'heure sidérale locale  $HSL$  est égale au moment de l'observation à  $6h37mn19.72s$ , calculer l'angle horaire  $AH$ .
3. En appliquant la formule des cotangentes, montrer que l'azimut  $Az$  de l'étoile est donné par la formule :

$$\operatorname{tg}Az = \frac{\sin AH}{\cos AH \sin \varphi - \cos \varphi \operatorname{tg} \delta}$$

4. Calculer alors l'azimut  $Az$ .
5. Calculer la distance zénithale  $z$  de l'étoile.

**Problème 2.3** Soit la sphère unité  $(S^2)$  de  $\mathbb{R}^3$ . On considère le triangle sphérique  $ABC$  avec :

$$A = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} \cos \varphi_B \\ 0 \\ \sin \varphi_B \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} \cos \varphi_C \cos \lambda_C \\ \cos \varphi_C \sin \lambda_C \\ \sin \varphi_C \end{pmatrix}$$

et  $M$  un point quelconque de  $(S^2)$  :  $M = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \lambda \\ \cos \varphi \sin \lambda \\ \sin \varphi \end{pmatrix}$ . On appelle  $(\Gamma)$  le grand cercle de  $(S^2)$  passant par les points  $B$  et  $C$ .

1. Montrer que si  $M(\varphi, \lambda) \in (\Gamma)$ , alors  $\varphi = \Phi(\lambda)$  avec :

$$\cos\varphi_C \sin\varphi_C \sin\lambda_C \sin\Phi = \cos\Phi(\sin\varphi_B \cos\varphi_C \sin(\lambda_C - \lambda) + \cos\varphi_B \sin\varphi_C \sin\lambda) \quad (2.7)$$

2. Exprimer la surface du triangle sphérique  $ABC$  en utilisant l'intégrale de la fonction  $\sin\Phi$  entre deux bornes que l'on déterminera.

3. On introduit l'angle  $\omega$  que fait le vecteur  $T_\Gamma$  tangent en  $M$  au grand cercle  $(\Gamma)$  avec le vecteur  $T_m$  tangent en  $M$  au méridien passant par  $M$ . Vérifier que  $\frac{d\omega}{d\lambda} = \sin\varphi$  (aide : on peut dériver, par rapport à  $\lambda$ , deux fois l'équation (2.7)).

4. En déduire la valeur de l'aire  $S$  du triangle sphérique  $ABC$ .

# Chapitre 3

## *Notions d'Astronomie de Position*

### 3.1 Rappels Historiques

Il n'est pas possible de déterminer la période où l'homme avait commencé à s'intéresser aux étoiles et aux astres. Cependant, cet intérêt à l'astronomie s'était développé peu à peu (*P. Vanicěk & E.J. Krakiwsky*, 1986). Ainsi, les astronomes chinois s'étaient occupés de l'observation des astres et des étoiles (observation d'une éclipse solaire 2667 avant J.C.), de même pour les peuples habitants la région des rivières le Tigre et l'Euphrate, les peuples d'Egypte et les Grecs. On trouve par exemple *Thales de Miletus* qui prédit l'éclipse solaire en mai 685 avant J.C. *Eratosthenes* (276-194 avant J.C.) calcula la circonférence de la Terre (39000 km), l'astronome et mathématicien *Hipparque* (190-120 avant J.C.) avait trouvé les plus importantes irrégularités du mouvement apparent du soleil et de la lune et il découvrit la précession (mouvement du pôle).

L'astronome *Claude Ptolémée* (80-168) avait compilé toutes les théories d'astronomie de l'époque que les Arabes avaient traduit en un ouvrage appelé "Al-Megiste". La civilisation islamique a apporté aussi sa contribution dans les connaissances astronomiques surtout sous les règnes d'*Abu Jaafar Al Mansour* (754-775), *Haroun Al Rachid* (786-809) et *Abu Jaafar Al Mamoun* (812-833). Parmi les astronomes arabes, on cite : *Mohamed Ibn Jabir Al Battani* (mort en 929) qui avait fait des catalogues astronomiques des mouvements des planètes.

Ses travaux furent traduits en latin et imprimés à Nuremberg (Allemagne) en 1537. Il calcula la durée de l'année solaire à 2 mn près.

*Ibn Al Haitam* (965-1039), dit *Al Hazan* en Europe, avait étudié la réfraction de l'atmosphère et calcula l'altitude de l'atmosphère pour la première fois. On cite aussi *Abu Rayhan Al Biruni* (973-1055) qui était aussi un éminent astronome en plus de ses travaux en mathématiques. *Nassireddine Al Tusi* (1201-1274) construisit le premier observatoire moderne et de plus, il avait développé la trigonométrie sphérique.

Au 15ème siècle, c'est le commencement de l'intérêt en Europe à l'astronomie grâce au monde Arabe. *Nicolas Copernic* (1473-1543) a démenti la théorie qui dit que la Terre est le centre de l'Univers et a démontré que le soleil est le centre du système solaire. *Tycho-Brahé* (1546-1609) l'éminent astronome danois a adhéré à la théorie de Plotémé avant l'invention du télescope. *Johannes Kepler* (1571-1630) découvrit la forme elliptique des orbites des planètes. *Galileo Galilée* (1564-1642) astronome italien, était le premier qui a fait usage du télescope. *Isaac Newton* (1642-1727) mathématicien et physicien anglais découvrit la loi de la Gravitation (1660).

L'astronomie a connu un grand essor au 18ème siècle grâce aux mathématiciens de cette période comme *Leonhard Euler* (1707-1783), *Joseph-Louis Lagrange* (1736-1813) et aussi à la création des observatoires astronomiques comme ceux de Paris en 1667 par *Jean Dominique Cassini* (1625-1712) et de Greenwich en 1675. *Edmont Halley* (1656-1742) avait compilé un catalogue des positions de l'hémisphère Sud et détecta une comète en 1682 que porta son nom après sa mort.

Actuellement l'astronomie s'est avancée grâce à l'introduction de nouvelles méthodes telles que la photographie ou l'analyse spectrale, et l'envoi des satellites artificiels dont le premier a été lancé en octobre 1957.

### 3.2 Objectifs de l'Astronomie

Pour le géodésien, l'astronomie est un moyen de détermination de certaines inconnues du point stationné à partir d'observations sur les astres ou des étoiles.

Les observations astronomiques effectuées dans ce cadre déterminent la verticale physique du point de l'observation, celle-ci étant matérialisée par l'axe de rotation de l'instrument. L'astronomie physique fournit comme résultat la distribution des verticales aux différents points stationnés. Si on assimile la verticale à la normale à la surface modèle de référence, on peut alors localiser ces points. On parlera alors d'*astronomie de position*. En géodésie tridimensionnelle, l'astronomie donne la direction de la tangente à la ligne de force du champ de pesanteur au point considéré.

Cependant, la géodésie ne peut se détacher de l'astronomie. En effet, il a toujours fallu, pour placer les points sur la sphère ou l'ellipsoïde de référence ou dans un trièdre trirectangle, fixer les axes des coordonnées. Alors un des axes privilégiés est l'axe de rotation de la Terre. Ce dernier n'est pas matérialisé sur la surface topographique, mais il apparaît dans l'observation du mouvement de la Terre ou dans l'observation des étoiles. Donc, le géodésien est nécessairement astronome. Alors, les observations astronomiques permettent en géodésie de déterminer :

- les 2 inconnues fixant la direction de la verticale physique du lieu  $(\phi, \lambda)$  ;
- l'orientation d'une direction (l'azimut) ;
- les coordonnées absolues d'un premier point d'un réseau géodésique appelé aussi point fondamental.

### 3.3 Les Systèmes de Référence

Le principe fondamental des déterminations astronomiques repose sur le fait que dans le repère lié aux étoiles, celles-ci occupent des positions pratiquement fixes, qu'il est possible de calculer et de les regrouper en catalogues d'étoiles. Un catalogue d'étoiles comprend les coordonnées équatoriales célestes  $(\alpha, \delta)$  des étoiles observées, réduites à une époque moyenne conventionnelle. Un catalogue fondamental est issu de la compilation de plusieurs catalogues provenant de préférence d'observations absolues.

Le système pratique de référence est défini par le catalogue fondamental, adopté à l'échelle internationale. Le catalogue fondamental FK4 était publié en 1963. Le catalogue le plus récent est le FK6 daté de 2000. Il est imprimé en deux volumes regroupant les données de 4150 étoiles.

## 3.4 Notions d'Astronomie de Position

### 3.4.1. Sphère Céleste - Mouvement Diurne

**Définition 3.1** *La sphère céleste est une sphère de rayon infiniment grand sur laquelle sont projetées les perspectives des étoiles (Fig. 3.1).*

*On appelle constellation la figure formée par les étoiles.*

En regardant les étoiles, on s'aperçoit que les étoiles se déplacent dans leur ensemble : c'est le mouvement diurne (*F. Tisserand & H. Andoyer, 1912*).

Le mouvement diurne obéit à 3 lois :

- la sphère céleste tourne autour d'un de ses diamètres ;
- le mouvement s'effectue dans le sens rétrograde (non direct) ;
- le mouvement est uniforme et sa période est voisine de  $24h(23h56mn)$ .

### 3.4.2. Définitions :

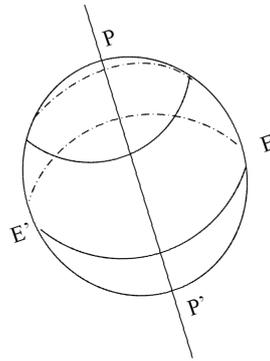
**Définition 3.2** *L'axe du monde est le diamètre autour duquel la sphère céleste effectue son mouvement.*

**Pôles célestes** : P, P' ; P pôle nord, P' pôle sud.

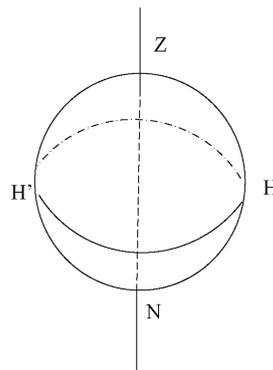
**Définition 3.3** *L'équateur céleste est le grand cercle perpendiculaire à l'axe du monde. L'intersection de la sphère céleste par un plan parallèle à EE' est un parallèle céleste. Un parallèle céleste est la trajectoire des étoiles en mouvement diurne. (Fig. 3.1)*

**Définition 3.4** *La verticale d'un lieu est la direction donnée par un fil à plomb : Z c'est le zénith, N c'est le nadir. L'horizon est le grand cercle dont le plan est perpendiculaire à ZN (Fig. 3.2).*

**Définition 3.5** *Le plan méridien d'un lieu est le plan défini par la verticale et l'axe du monde (Fig. 3.3). Le méridien d'un lieu c'est un grand cercle intersection du plan méridien et de la sphère céleste. Le méridien est local.*



**Fig. 3.1** La sphère céleste



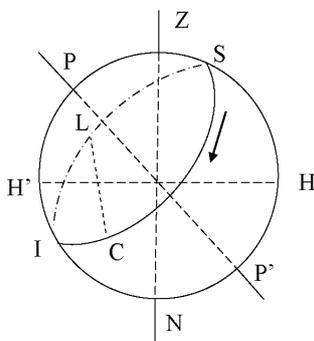
**Fig. 3.2** La verticale d'un lieu

*Le demi-méridien supérieur : c'est le plan passant par  $PP'$  et contenant le zénith.*

La trajectoire de l'étoile rencontre le méridien en deux points S et I :

- S est le passage supérieur (le plus près du zénith) ou culmination ;
- I est le passage inférieur.

La trajectoire de l'étoile rencontre en général l'horizon en deux positions :



**Fig. 3.3** Le plan méridien

- L : est le lever, où l'étoile devient visible ;
- C : est le coucher où l'étoile disparaît.

Les étoiles qui n'ont ni coucher, ni lever sont appelées étoiles circumpolaires.

**Définition 3.6** *Le plan vertical est un plan contenant la verticale ZN.*

**Définition 3.7** *On appelle vertical d'un astre le plan vertical passant par l'astre (Fig. 3.4).*

**Définition 3.8** *Le méridien est le vertical passant par le pôle ; il rencontre l'horizon en un point n : c'est le Nord géographique, le point opposé au Nord c'est le Sud. Dans la direction perpendiculaire, on a l'Est et l'Ouest. L'Est se trouve à droite de la ligne Sud-Nord.*

Pour un astre : le lever dans l'Est, à partir de la culmination il passe dans la région Ouest c'est le coucher.

### 3.4.3. Rappels d'Unités de Mesures des Arcs

On rappelle que le *radian* (*rd*) est l'unité internationale des mesures des angles. On donne ci-dessous les autres unités utilisées.

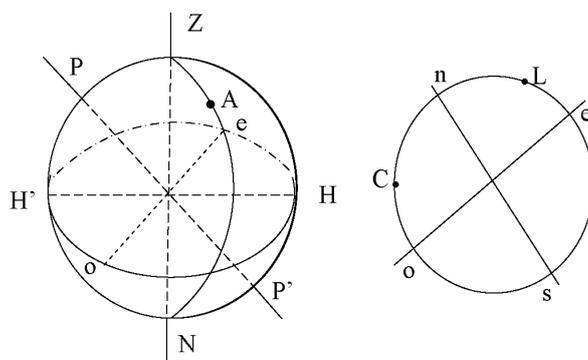


Fig. 3.4 Vertical d'un astre

Le Système Centésimal	Le Système Sexagésimal	Le Système Horaire
400gr	360°	24h
1 grade = 1/64rd	1° = 1/57rd	1 heure = 15°
1 cg = 1/6400rd	1 minute = 1' = 1°/60	1 mn = 1h/60 = 15'
1 dcmg = 1/640000rd	1 seconde = 1'' = 1'/60	1 s = 1mn/60 = 15''

Tableau 3.1 Table des Unités

#### 3.4.4. Systèmes de Coordonnées Locales Horizontales (Fig. 3.5)

**Définition 3.9** L'azimut d'un astre est l'angle formé par le vertical de l'astre et le plan méridien. Il est compté à partir du Nord dans le sens rétrograde (en grades).

$$Az = \widehat{nOa} \quad (3.1)$$

**Définition 3.10** La hauteur d'un astre est l'angle entre la direction de l'astre et l'horizon, compté à partir de ce dernier, positivement vers le zénith et négativement vers le nadir (en degrés). On le note par  $h$ .

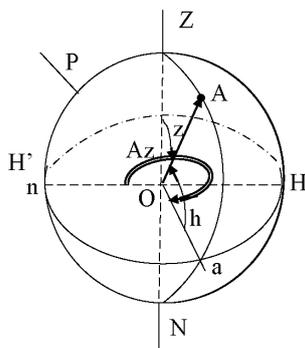
$$h = \widehat{aOA} \quad (3.2)$$

**Définition 3.11** La distance zénithale  $z$  est l'angle de la verticale avec la direction de l'astre, se compte du zénith vers le nadir.

On a :

$$z = \widehat{ZOA} \quad (3.3)$$

$$0 \leq z \leq 200 \text{ gr} \text{ et } z + h = 100 \text{ gr} \quad (3.4)$$



**Fig. 3.5** Les coordonnées locales horizontales

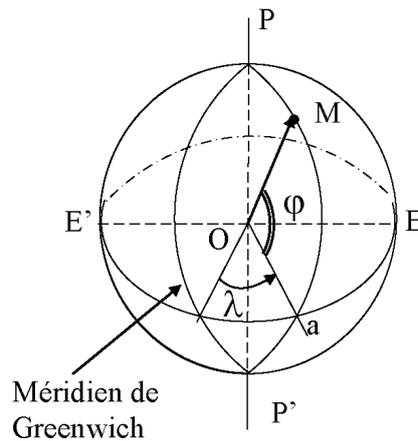
### 3.4.5. Coordonnées Géographiques

Soit M un point de la surface de la Terre.

**Définition 3.12** La latitude géographique  $\phi$  est l'angle du plan de l'équateur avec la verticale du lieu, positivement vers le pôle Nord, négativement vers le pôle Sud.

**Définition 3.13** La longitude géographique  $\lambda$  est l'angle formé par le méridien origine avec le méridien du lieu. Le méridien origine est le méridien passant par

*l'observatoire de Greenwich.  $\lambda$  est comptée positivement vers l'Est en grades, degrés ou en heures.*



**Fig. 3.6** Latitude et longitude Géographiques

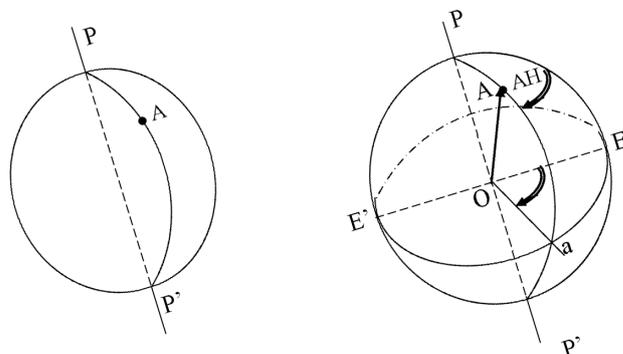
### ***3.4.6. Angle Horaire - Coordonnées Equatoriales Célestes - Temps Sidéral -***

**Définition 3.14** *Le cercle horaire d'un astre est le demi-grand cercle passant par le pôle et l'astre (**Fig. 3.7**).*

Le cercle horaire passant par le zénith c'est le méridien supérieur.

**Définition 3.15** *L'angle horaire AH d'un astre A en un lieu donné est l'angle formé par le méridien supérieur du lieu et le cercle horaire de l'astre. Il se compte en heures dans le sens rétrograde à partir de la culmination (**Fig. 3.7**).*

$$AH = \widehat{EOa} \quad (3.5)$$



**Fig. 3.7** Cercle et angle horaires

### Coordonnées Equatoriales Célestes

Pour positionner le cercle horaire de l'astre  $A$ , on considère un astre fictif  $\gamma$  situé sur l'équateur. On prendra comme origine le cercle horaire de  $\gamma$  (**Fig. 3.8**).

**Définition 3.16** L'ascension droite  $\alpha$  est l'angle entre le cercle horaire de ( $\gamma$ ) et le cercle horaire de l'astre, compté dans le sens direct, en heures, il mesure l'arc  $\gamma a$  (**Fig. 3.8**).

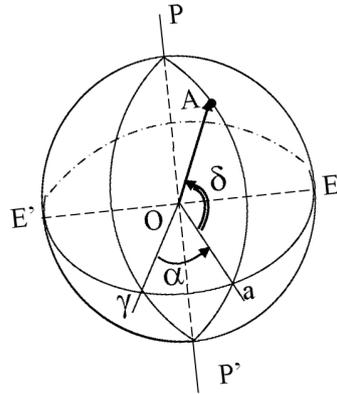
**Définition 3.17** La déclinaison  $\delta$  est l'angle du plan de l'équateur avec la direction de l'astre, compté à partir de l'équateur positivement vers  $P$ , négativement vers  $P'$ .  $\delta$  mesure  $aA$  (**Fig. 3.8**).

$(\alpha, \delta)$  constituent les coordonnées équatoriales célestes. Elles sont indépendantes du temps.

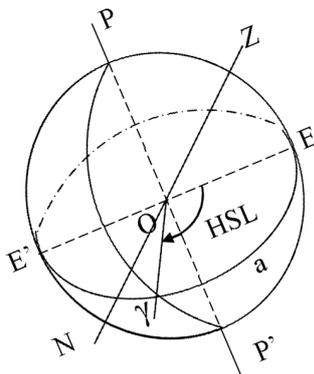
### Heure Sidérale Locale (HSL)

**Définition 3.18** On appelle HSL en un lieu donné et à un instant donné l'angle horaire de l'astre  $\gamma$ . C'est l'angle formé par le méridien supérieur et le cercle horaire de  $\gamma$  (**Fig. 3.9**).

$$HSL = \widehat{EO\gamma} \quad (3.6)$$



**Fig. 3.8** Les coordonnées équatoriales célestes



**Fig. 3.9** Heure sidérale locale

**Définition 3.19** *Un jour sidéral : c'est l'intervalle de temps qui sépare 2 culminations successives du point  $\gamma$ . Il se divise en 24 heures sidérales.*

### Relation Fondamentale de l'Astronomie de Position

A partir de la figure (3.10), on a :

$$\widehat{EO\gamma} = \widehat{EOa} + \widehat{aO\gamma}$$

Or :

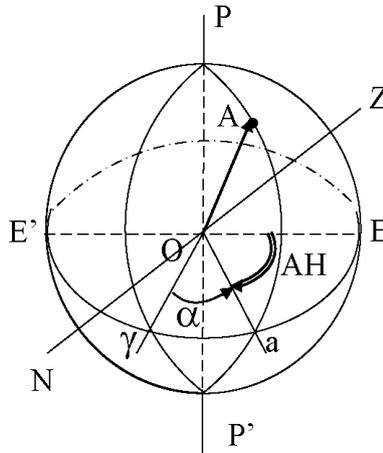
$$\begin{aligned}\widehat{EO\gamma} &= HSL \\ \widehat{EOa} &= AH\end{aligned}$$

Comme  $\widehat{aO\gamma} \geq 0$ , on a donc :

$$\widehat{aO\gamma} = \alpha$$

Par suite, on obtient la relation fondamentale de l'astronomie de position :

$$\boxed{HSL = AH + \alpha} \quad (3.7)$$



**Fig. 3.10** Relation fondamentale de l'astronomie de position

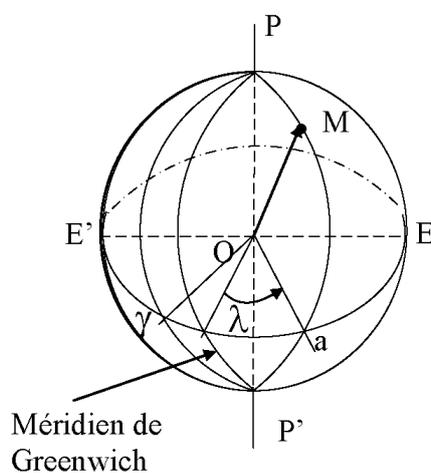
Au moment de **la culmination**, on a :

$$\boxed{AH = 0 \quad \text{et} \quad HSL = \alpha} \quad (3.8)$$

### 3.4.7. Calcul de l'heure sidérale locale

Soit un point  $M$  de la Terre de longitude  $\lambda$ . Soit  $HSL_M$  l'heure sidérale locale du lieu de  $M$ . Si on fait intervenir l'heure sidérale locale de Greenwich qu'on note  $HSG$ , on a la relation (**Fig. 3.11**) :

$$\boxed{HSL_M = HSG + \lambda} \quad (3.9)$$



**Fig. 3.11** Relation entre  $HSL_M$  et  $HSG$

### 3.4.8. Les Principales échelles de temps

Parmi les variables primordiales de l'astronomie de position figure la variable temps. Le temps définit une échelle continue à partir d'une origine qu'on définit par convention. La mesure de l'unité de la variable temps varie d'une définition à une autre. On présente ci-après les principales échelles de temps.

**Le Temps Atomique International (TAI) :**

C'est l'étalon de temps fourni par les horloges atomiques (temps uniforme par définition). Il n'est plus rattaché à un mouvement de rotation uniforme, mais plutôt à la période de radiation de l'atome de césium 133. La seconde : c'est l'unité du Système International dont voici la définition :

**Définition 3.20** *La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133.*

**Temps Terrestre (TT) :** Il découle du mouvement de révolution de la Terre (temps quasi-uniforme), il s'est substitué depuis 1991 au Temps Dynamique Terrestre (TDT). TT assure la continuité en 1984 avec le Temps des Ephémérides (ET). On a la relation suivante à la précision de la milliseconde :

$$\boxed{TT = TDT = ET = TAI + 32,184 s} \quad (3.10)$$

**Le Temps Universel (UT) :** On définit :

\* UT1 (Temps Universel "Primaire") découle du mouvement de rotation de la Terre autour de son axe instantané de rotation (temps non uniforme connu a posteriori) ;

\* UTC (Temps Universel Coordonné) est une approximation linéaire continue par morceaux de UT1 dont il s'écarte au maximum de 0,9 s (temps uniforme par paliers) ;

\* UTC diffère de TAI d'un nombre entier de secondes, ce jour <sup>1</sup> :

$$\boxed{UTC = TAI - 35,000 s} \quad (3.11)$$

\* A la précision considérée (1 s), UT (Temps Universel) désigne indifféremment UT1 ou UTC.

---

1. En vigueur à compter du 1er juillet 2012 à 0h UTC jusqu'à nouvel avis (Cf. bulletin C 43 de l'IERS).

### 3.4.9. Le passage du temps $TU$ au temps sidéral et vice versa

Notons  $TS$  et  $TU$  respectivement le temps sidéral et le temps  $TU$ , on a les formules suivantes (A. Danjon, 1980) :

$$\begin{aligned} TU &= TS \left( 1 - \frac{1}{366.2422} \right) = TS \times \frac{365.2422}{366.2422} \\ TS &= TU \left( 1 + \frac{1}{365.2422} \right) = TU \times \frac{366.2422}{365.2422} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Application : calcul de  $HSL$  à une certaine heure  $TU$ , à un lieu de longitude  $\lambda$ , on a :

$$HSL = HSG_{0hTU} + TU \times \frac{366.2422}{365.2422} + \lambda \quad (3.13)$$

## 3.5 Exercices et Problèmes

**Exercice 3.1** Au lieu de latitude  $\varphi = 36^\circ 54'$  Nord, on veut calculer les hauteurs  $h_1$  et  $h_2$  de l'étoile polaire de déclinaison  $\delta = +89^\circ$  respectivement à son passage supérieur et à son passage inférieur au méridien du lieu. Déterminer  $h_1$  et  $h_2$ .

**Problème 3.1** 1. En un lieu de latitude  $\varphi$  quelles sont les étoiles :

- qui ne se couchent pas ( qui sont toujours visibles );
- qui ne sont jamais visibles.

Traiter le cas : lieu dans l'hémisphère nord.

2. Quelle est la condition pour qu'une étoile culmine au zénith ?

3. Cas particulier du soleil : la déclinaison du soleil varie de  $-23^\circ 27'$  à  $+23^\circ 27'$  au cours de l'année. On appelle jour le moment pendant lequel le soleil est au-dessus de l'horizon, nuit lorsque le soleil est au-dessous de l'horizon, midi l'instant de la culmination, minuit l'instant du passage inférieur.

a) Montrer qu'au moment des équinoxes le jour et la nuit sont d'égale durée quel que soit le lieu.

b) Montrer qu'à l'équateur, quelle que soit la date le jour et la nuit sont d'égale durée.

c) Au moment du solstice d'hiver quels sont les lieux :

- où il fait constamment jour ;
- où il fait constamment nuit.

Mêmes questions au moment du solstice d'été.

d) Quels sont les lieux de la Terre où le soleil culmine au zénith au moment du solstice d'hiver. Même question au moment du solstice d'été.

e) Quels sont les lieux de la Terre où au moins une fois dans l'année le soleil culmine au zénith.

**Problème 3.2** Une station astronomique est située en un lieu de coordonnées géographiques :  $\varphi = +45^\circ 00'$ ;  $\lambda = +7\text{h}20\text{mn}$ .

En ce lieu, on observe une étoile A de coordonnées équatoriales :

$$\alpha = +11\text{h}13\text{mn}; \delta = 30^\circ 00'$$

L'observation se fait le jour de l'équinoxe de printemps le 21 mars à 0 heure TU. L'heure sidérale de Greenwich est 11h52mn.

1. Calculer l'heure sidérale locale du lever et du coucher de l'étoile A au lieu considéré.
2. En déduire l'heure TU du lever et du coucher de l'étoile au lieu considéré.

Remarque : on choisira le coucher qui a lieu après le lever.

**Problème 3.3** En un lieu de latitude  $43^\circ,521$  et de longitude  $+0\text{h}20\text{mn}57\text{s}$ , on cherche à pointer la galaxie d'Andromède de coordonnées équatoriales  $\alpha = 0\text{h}40\text{mn}$ ,  $\delta = 41^\circ 00'$  le 31 juillet 1992 à 21hTU.

On donne l'heure sidérale de Greenwich à 0hTU le 31/07/1992 :  $HSG_{0hTU} = 20\text{h}35\text{mn}28\text{s}$ .

1. Calculer l'heure sidérale locale à 21hTU.
2. En déduire l'angle horaire de la galaxie.
3. Calculer la distance zénithale de la galaxie à 21hTU.
4. Calculer son azimut à cette même heure.

**Problème 3.4** *En un lieu de l'hémisphère Nord de latitude  $\varphi$ , on mesure la longueur de l'ombre portée  $HC$ , à midi vrai (passage du soleil au méridien), par une tige verticale  $HA$  dont l'extrémité  $H$  est sur le sol supposé horizontal.*

1. *Donner l'expression  $HC$  en fonction de  $HA$  et de la distance zénithale  $Dz$  du soleil.*
2. *Donner l'expression de  $HC$  en fonction de  $HA$  et de  $\varphi$  :*
  - *aux équinoxes ;*
  - *aux solstices.*
3. *Quelle doit être la déclinaison du soleil et en quels lieux, pour que l'on ait  $HC = HA$  ?*
4. *En un lieu de latitude  $\varphi = 47^\circ$  en quelles saisons peut on avoir  $HC = HA$ .*
5. *Si on déplace  $HA$  le long d'un méridien, en restant dans l'hémisphère Nord, existe-t-il au cours de l'année des lieux où  $HC = 0$ , ou  $HC$  devient infiniment grand.*



# Chapitre 4

## *Courbes et Surfaces*

He who understands geometry may understand anything in this world.

Galileo Galilée (1564 - 1642)

### 4.1 Courbes Planes - Courbure

**Définition 4.1** Une courbe plane ( $\mu$ ) est une application de  $\mathbb{R} \Rightarrow \mathbb{R}^2$  entièrement déterminée par la donnée d'une fonction vectorielle  $\mathbf{M}(t)$  d'un paramètre  $t$  :

$$t \in \mathbb{R} \longrightarrow (x, y) \in \mathbb{R}^2 / \mathbf{OM}(x, y) = x(t) \cdot \mathbf{i} + y(t) \cdot \mathbf{j}$$

où  $(\mathbf{i}, \mathbf{j})$  la base orthonormée du plan XOY.

#### *4.1.1. Longueur d'un arc de la courbe*

L'élément élémentaire de longueur d'un arc est la quantité  $ds$  telle que :

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 = (x'^2 + y'^2).dt^2$$

avec  $x'$  et  $y'$  désignent les dérivées de  $x(t)$  et  $y(t)$  par rapport à la variable  $t$ , d'où :

$$ds = \sqrt{(x'^2 + y'^2)}.dt$$

Soit pour  $t = t_0$ ,  $M_0$  le point origine de l'arc, d'où en intégrant  $s$ , on obtient :

$$s = \int_{t_0}^t \sqrt{(x'^2 + y'^2)}.dt = F(t, t_0) \quad (4.1)$$

De l'équation (4.1), on peut exprimer  $t$  en fonction de  $s$ . On peut alors adopter comme paramètre la longueur d'un arc de  $(\mu)$  d'origine  $M_0$  c'est-à-dire  $s$  (l'abscisse curviligne) et de considérer la courbe définie par  $M(s)$ .

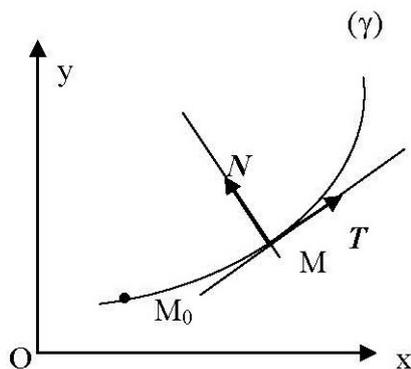


Fig. 4.1 Courbe plane

#### 4.1.2. La Tangente

Au point  $M$ , la courbe admet une tangente définie par le vecteur unitaire  $T$  :

$$\mathbf{T} = \frac{d\mathbf{M}}{ds} = \begin{pmatrix} \frac{dx}{ds} \\ \frac{dy}{ds} \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

### 4.1.3. Normale et Courbure

**Définition 4.2** La dérivée de  $\mathbf{T}$  par rapport à  $s$  (lorsqu'elle existe et n'est pas nulle) définit une direction orthogonale à la tangente portant le vecteur unitaire  $\mathbf{N}$  dite la normale au point  $M$ . On a alors :

$$\mathbf{N} = \frac{1}{\alpha} \frac{d\mathbf{T}}{ds} \quad (4.3)$$

avec :

$$\alpha = \left\| \frac{d\mathbf{T}}{ds} \right\| = \frac{1}{R} \quad (4.4)$$

$R$  est appelé rayon de courbure au point  $M$ .

## 4.2 Courbes Gauches

### 4.2.1. Trièdre de Frenêt<sup>1</sup>-Courbure-Torsion

**Définition 4.3** Une courbe gauche ( $\mu$ ) est une application de  $\mathbb{R} \implies \mathbb{R}^3$  entièrement déterminée par la donnée d'une fonction vectorielle  $\mathbf{OM}(t)$  d'un paramètre  $t$  :

$$t \in \mathbb{R} \implies (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 / \mathbf{OM}(x, y, z) = \begin{pmatrix} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

### 4.2.2. Longueur d'un arc de la courbe

L'élément élémentaire de longueur d'un arc est la quantité  $ds$  telle que

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 = (x'^2 + y'^2 + z'^2).dt^2$$

avec  $x', y'$  et  $z'$  désignent les dérivées de  $x(t), y(t)$  et  $z(t)$  par rapport à la variable  $t$ , d'où :

---

1. **Jean Frédéric Frenêt** (1816-1900) : mathématicien, astronome et météorologue français.

$$s = \int_{t_0}^t \sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2} dt$$

Soit pour  $t = t_0$ ,  $M_0$  le point origine de l'arc, d'où en intégrant  $s$ , on obtient :

$$s = F(t, t_0) \quad (4.6)$$

De l'équation (4.6), on peut exprimer  $t$  en fonction de  $s$ . On peut alors adopter comme paramètre la longueur d'un arc de  $(\mu)$  d'origine  $M_0$  c'est-à-dire  $s$  (l'abscisse curviligne) et de considérer la courbe gauche définie par  $M(s)$ .

### 4.2.3. La Tangente

Au point  $M$ , la courbe admet une tangente définie par le vecteur unitaire  $\mathbf{T}$ .

$$\mathbf{T} = \frac{d\mathbf{M}}{ds} = \begin{pmatrix} \frac{dx}{ds} \\ \frac{dy}{ds} \\ \frac{dz}{ds} \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

### 4.2.4. La Normale - Courbure

**Définition 4.4** La dérivée de  $\mathbf{T}$  par rapport à  $s$ , lorsqu'elle existe et n'est pas nulle, définit une direction orthogonale à la tangente portant le vecteur unitaire  $\mathbf{N}$  dite la normale au point  $M$ . On a alors :

$$\mathbf{N} = \frac{1}{\alpha} \frac{d\mathbf{T}}{ds} \quad (4.8)$$

avec :

$$\alpha = \left\| \frac{d\mathbf{T}}{ds} \right\| = \frac{1}{R} \quad (4.9)$$

$R$  est appelé rayon de courbure .

En effet,  $\|\mathbf{T}\| = 1 \Rightarrow \mathbf{T} \cdot \mathbf{T} = 1 \Rightarrow 2\mathbf{T} \cdot \frac{d\mathbf{T}}{ds} = 0$ . Donc : le vecteur  $\mathbf{T}$  est orthogonal à  $\frac{d\mathbf{T}}{ds}$ .

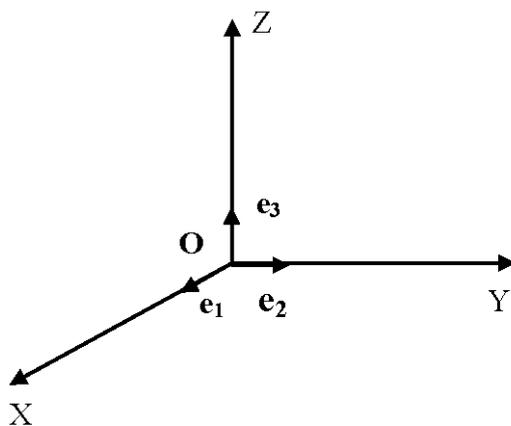


Fig. 4.2 Le trièdre de Frenêt

#### 4.2.5. Binormale

**Définition 4.5** La binormale est la droite passant par le point  $M$  et de direction le vecteur  $\mathbf{B}$  défini par :

$$\mathbf{B} = \mathbf{T} \wedge \mathbf{N} \quad (4.10)$$

On a évidemment :  $\|\mathbf{B}\| = 1$ . Le triplet  $(\mathbf{T}, \mathbf{N}, \mathbf{B})$  est direct et forme un trièdre dénommé le trièdre de Frenêt.

**Définition 4.6** Les plans définis par les vecteurs  $(\mathbf{T}, \mathbf{N})$ ,  $(\mathbf{N}, \mathbf{B})$  et  $(\mathbf{B}, \mathbf{T})$  sont appelés respectivement plan osculateur, plan normal et plan rectifiant.

### 4.2.6. Torsion

On calcule la dérivée du vecteur  $\mathbf{B}$  par rapport à  $s$ , on obtient :

$$\frac{d\mathbf{B}}{ds} = \frac{d\mathbf{T}}{ds} \wedge \mathbf{N} + \mathbf{T} \wedge \frac{d\mathbf{N}}{ds}$$

car  $\mathbf{T}$  et  $\frac{d\mathbf{N}}{ds}$  sont colinéaires, par conséquent  $\frac{d\mathbf{B}}{ds}$  est orthogonal à  $\mathbf{T}$ . Comme  $\mathbf{B}$  est unitaire,  $\frac{d\mathbf{B}}{ds}$  est aussi orthogonal à  $\mathbf{B}$ , donc  $\frac{d\mathbf{B}}{ds}$  est colinéaire à  $\mathbf{N}$ . On pose :

$$\boxed{\frac{d\mathbf{B}}{ds} = \frac{-1}{\tau(s)} \mathbf{N}} \quad (4.11)$$

**Définition 4.7** Le réel  $1/\tau(s)$  est appelé torsion de  $(\mu)$  au point  $M(s)$ .

On calcule la dérivée du vecteur  $\mathbf{N}$ . Comme  $\mathbf{N} = \mathbf{B} \wedge \mathbf{T}$ , on obtient :

$$\frac{d\mathbf{N}}{ds} = \frac{d\mathbf{B}}{ds} \wedge \mathbf{T} + \mathbf{B} \wedge \frac{d\mathbf{T}}{ds} = \frac{-1}{\tau(s)} \mathbf{N} \wedge \mathbf{T} + \mathbf{B} \wedge \frac{\mathbf{N}}{R}$$

donc :

$$\boxed{\frac{d\mathbf{N}}{ds} = \frac{-\mathbf{T}}{R} + \frac{\mathbf{B}}{\tau(s)}} \quad (4.12)$$

Les trois relations exprimant les dérivées premières des vecteurs du repère de Frenêt peuvent s'écrire sous forme matricielle :

$$\boxed{\frac{d}{ds} \begin{pmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{B} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{R} & 0 \\ \frac{-1}{R} & 0 & \frac{1}{\tau} \\ 0 & \frac{-1}{\tau} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{T} \\ \mathbf{N} \\ \mathbf{B} \end{pmatrix}} \quad (4.13)$$

## 4.3 Surfaces

**Définition 4.8** Une surface  $(\sigma)$  de  $\mathbb{R}^3$  est une application d'un domaine  $\mathcal{D} \subset \mathbb{R}^2 \Rightarrow \mathbb{R}^3$  à  $(u, v) \in \mathcal{D} \subset \mathbb{R}^2$  fait correspond un triplet  $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$  où  $x, y, z$  sont des fonctions continues des deux paramètres  $(u, v)$  :

$$(u, v) \in \mathcal{D} \Rightarrow (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 / \mathbf{OM}(u, v) = \begin{pmatrix} x = x(u, v) \\ y = y(u, v) \\ z = z(u, v) \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

Donc  $(u, v) \in \mathcal{D} \Rightarrow (x, y, z) \in (\sigma)$ .

Si la fonction  $\mathbf{OM}(u, v)$  est dérivable dans le domaine  $\mathcal{D}$ , on peut définir en tout point de  $(\sigma)$  un plan tangent et une normale.

Soient  $\mathbf{M}'_u$  et  $\mathbf{M}'_v$  les deux vecteurs dérivées au point  $M$  avec :

$$\frac{\partial \mathbf{OM}}{\partial u}(u, v) = \mathbf{M}'_u = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} \\ \frac{\partial y}{\partial u} \\ \frac{\partial z}{\partial u} \end{pmatrix}; \quad \frac{\partial \mathbf{OM}}{\partial v}(u, v) = \mathbf{M}'_v = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial v} \\ \frac{\partial z}{\partial v} \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

Alors l'équation du plan tangent est définie par :

$$\mathbf{MP} \cdot (\mathbf{M}'_u \wedge \mathbf{M}'_v) = 0$$

$P$  est un point courant du plan tangent. On pose :

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{M}'_u \wedge \mathbf{M}'_v}{\|\mathbf{M}'_u \wedge \mathbf{M}'_v\|} \quad (4.16)$$

un vecteur unitaire porté par la normale à la surface  $(\sigma)$  au point  $M$ .

Les paramètres  $(u, v)$  sont dits les *coordonnées curvilignes* sur la surface  $(\sigma)$ . Une courbe tracée sur la surface est définie par une relation  $g(u, v) = 0$  ou par  $u = u(t)$ ;  $v = v(t)$  avec  $t$  un paramètre. En particulier, les courbes  $u = \text{constante}$  et  $v = \text{constante}$  sont dites les *courbes coordonnées*.

## 4.4 La Première Forme Fondamentale

L'élément linéaire  $ds$  sur la surface  $(\sigma)$  est la distance de deux points infiniment voisins, le carré de  $ds$  est le carré scalaire de  $d\mathbf{M}$  soit :

$$ds^2 = d\mathbf{M} \cdot d\mathbf{M} = d\mathbf{M}^2 = \|d\mathbf{M}\|^2 \quad (4.17)$$

Or :

$$\mathbf{OM}(u, v) \begin{pmatrix} x(u, v) \\ y(u, v) \\ z(u, v) \end{pmatrix} \implies d\mathbf{M} = \mathbf{M}'_u du + \mathbf{M}'_v dv = \begin{pmatrix} dx = x'_u du + x'_v dv \\ dy = y'_u du + y'_v dv \\ dz = z'_u du + z'_v dv \end{pmatrix}$$

Par suite :

$$d\mathbf{M}^2 = ds^2 = \mathbf{M}'_u \cdot \mathbf{M}'_u du^2 + 2\mathbf{M}'_u \cdot \mathbf{M}'_v dudv + \mathbf{M}'_v \cdot \mathbf{M}'_v dv^2$$

On pose :

$$\begin{cases} E = \mathbf{M}'_u \cdot \mathbf{M}'_u \\ F = \mathbf{M}'_u \cdot \mathbf{M}'_v \\ G = \mathbf{M}'_v \cdot \mathbf{M}'_v \end{cases} \quad (4.18)$$

alors  $ds^2$  s'écrit :

$$\boxed{ds^2 = E \cdot du^2 + 2 \cdot F \cdot dudv + G \cdot dv^2} \quad (4.19)$$

(4.19) est dite la première forme fondamentale, elle définit la métrique de la surface  $(\sigma)$ .

#### 4.4.1. Ecriture matricielle de la première forme fondamentale

On appelle  $g = (g_{ij})$  la matrice carrée  $2 \times 2$  telle que :

$$\begin{aligned} g_{11} &= E \\ g_{12} &= g_{21} = F \\ g_{22} &= G \end{aligned}$$

Soit :

$$g = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix} \quad (4.20)$$

Alors l'équation (4.19) s'écrit sous la forme :

$$ds^2 = (du, dv) \cdot g \cdot \begin{pmatrix} du \\ dv \end{pmatrix} = (du, dv) \cdot \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} du \\ dv \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

La matrice  $g$  s'appelle la matrice du tenseur métrique.

### 4.4.2. Angles de deux courbes coordonnées et Elément d'aire

\* On a :  $F = \mathbf{M}'_u \cdot \mathbf{M}'_v = \|\mathbf{M}'_u\| \cdot \|\mathbf{M}'_v\| \cos\alpha$ , d'où :

$$\cos\alpha = \frac{F}{\|\mathbf{M}'_u\| \cdot \|\mathbf{M}'_v\|} = \frac{F}{\sqrt{E}\sqrt{G}} = \frac{F}{\sqrt{EG}}$$

et en considérant  $\alpha \in [0, \pi]$  :

$$\sin\alpha = \sqrt{1 - \cos^2\alpha} = \sqrt{1 - \frac{F^2}{E \cdot G}} = \sqrt{\frac{E \cdot G - F^2}{E \cdot G}}$$

On pose parfois :

$$H = \sqrt{E \cdot G - F^2} = h^2(u, v) \quad (4.22)$$

soit :

$$H = \|\mathbf{M}'_u \wedge \mathbf{M}'_v\| = \|\mathbf{M}'_u\| \cdot \|\mathbf{M}'_v\| \sin\alpha \quad (4.23)$$

Par suite, le vecteur unitaire normal  $\mathbf{n}$  a pour expression :

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{M}'_u \wedge \mathbf{M}'_v}{\|\mathbf{M}'_u \wedge \mathbf{M}'_v\|} = \frac{\mathbf{M}'_u \wedge \mathbf{M}'_v}{H} \quad (4.24)$$

\* En considérant maintenant le parallélogramme curviligne de sommet  $M(u, v)$  et de côtés les vecteurs  $\mathbf{M}'_u du$  et  $\mathbf{M}'_v dv$ , alors l'élément infinitésimal d'aire  $dA$  a pour expression :

$$dA = \|\mathbf{M}'_u du \wedge \mathbf{M}'_v dv\| = \|\mathbf{M}'_u\| \cdot \|\mathbf{M}'_v\| du \cdot dv \cdot \sin\alpha = \sqrt{E \cdot G - F^2} dudv = H dudv$$

On le note aussi :

$$\boxed{dA = \sqrt{E \cdot G - F^2} du \wedge dv = H du \wedge dv} \quad (4.25)$$

### 4.4.3. Coordonnées Orthogonales et Coordonnées Symétriques

Les coordonnées  $(u, v)$  sont dites **orthogonales** si  $F = \mathbf{M}'_u \cdot \mathbf{M}'_v = 0$ , soit  $\cos\alpha = 0$ , donc  $\alpha$  est un angle droit.

Les coordonnées orthogonales sont dites **coordonnées symétriques** si de plus  $E = G$ . Alors la première forme quadratique s'écrit :

$$ds^2 = Edu^2 + Gdv^2 = E(du^2 + dv^2) = H(du^2 + dv^2) = h^2(u, v)(du^2 + dv^2)$$

**Exemple :**

On considère une sphère de rayon  $R$  qu'on note  $(\sigma)$ , elle est paramétrée par :

$$\mathbf{OM} \begin{vmatrix} R \cos \varphi \cos \lambda \\ R \cos \varphi \sin \lambda \\ R \sin \varphi \end{vmatrix}$$

avec  $\varphi \in [-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}]$ ,  $\lambda \in [0, +2\pi[$ . Les courbes coordonnées de  $(\sigma)$  sont les méridiens  $\lambda = \text{constante}$  et les parallèles  $\varphi = \text{constante}$ . On remarque qu'elles se coupent en un angle droit. On calcule la première forme fondamentale de la sphère :

$$\mathbf{OM}'_{\varphi} = \begin{vmatrix} -R \sin \varphi \cos \lambda \\ -R \sin \varphi \sin \lambda \\ R \cos \varphi \end{vmatrix}, \quad \mathbf{OM}'_{\lambda} = \begin{vmatrix} -R \cos \varphi \sin \lambda \\ R \cos \varphi \cos \lambda \\ 0 \end{vmatrix} \quad (4.26)$$

D'où :

$$\begin{aligned} E &= \mathbf{OM}'_{\varphi} \cdot \mathbf{OM}'_{\varphi} = R^2 \\ F &= \mathbf{OM}'_{\varphi} \cdot \mathbf{OM}'_{\lambda} = 0 \\ G &= \mathbf{OM}'_{\lambda} \cdot \mathbf{OM}'_{\lambda} = R^2 \cos^2 \varphi \end{aligned}$$

$F = 0$  justifie ce qui a été dit ci-dessus sur l'orthogonalité des courbes coordonnées. Ces dernières sont orthogonales mais non symétriques. En effet :

$$ds^2 = R^2 d\varphi^2 + R^2 \cos^2 \varphi d\lambda^2 = R^2 \cos^2 \varphi \left( \frac{d\varphi^2}{\cos^2 \varphi} + d\lambda^2 \right)$$

La variable  $L$  telle que :

$$dL = \frac{d\varphi}{\cos \varphi} \quad (4.27)$$

forme avec  $\lambda$  un couple de coordonnées symétriques, car :

$$ds^2 = R^2 \cos^2 \varphi (dL^2 + d\lambda^2) \quad (4.28)$$

$L$  est appelée **latitude croissante** ou **latitude ou variable de Mercator**<sup>2</sup>.

On pose :

$$t = \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \implies \cos \varphi = \frac{1-t^2}{1+t^2}$$

d'où :

---

2. **Gerhardus Mercator** (1512-1594) : cartographe, astronome et ingénieur belge. Son nom était donné à la représentation cylindrique conforme proposée par lui-même.

$$dt = (1+t^2) \frac{d\varphi}{2} \implies d\varphi = \frac{2dt}{1+t^2}$$

De (4.27), on obtient  $L$  vérifiant  $L(0) = 0$  :

$$L = \int_0^\varphi \frac{dw}{\cos w} = \int_0^{tg \frac{\varphi}{2}} \frac{2dt}{1+t^2} \cdot \frac{1+t^2}{1-t^2} = \int_0^{tg \frac{\varphi}{2}} \frac{2dt}{1-t^2} \quad (4.29)$$

On se restreint à  $\varphi \in [-\varphi_1, +\varphi_1]$  où  $0 < \varphi_1 < \pi/2$ . L'équation (4.29) s'écrit :

$$L = \int_0^\varphi \frac{dw}{\cos w} = \int_0^{tg \frac{\varphi}{2}} \frac{dt}{1+t} + \int_0^{tg \frac{\varphi}{2}} \frac{dt}{1-t} = \left[ \text{Log} \left| \frac{1+t}{1-t} \right| \right]_0^{tg \frac{\varphi}{2}} = \text{Log} \left| \text{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \right| = \text{Log} \text{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (4.30)$$

car  $\text{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) > 0$ , donc :

$$\boxed{L = \text{Log} \text{tg} \left( \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \right)} \quad (4.31)$$

D'où :

$$\text{tg} \left( \frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) = \exp(L) = e^L$$

Soit l'expression de la latitude  $\varphi$  en fonction de  $L$  :

$$\varphi = 2 \text{Arctg}(e^L) - \frac{\pi}{2}$$

## 4.5 La Deuxième Forme Fondamentale

On calcule maintenant le vecteur  $d^2\mathbf{M}$  la différentielle seconde de  $\mathbf{OM}$ . On a alors :

$$\begin{aligned} d^2\mathbf{M} &= d(d\mathbf{M}) = d(\mathbf{OM}'_u \cdot du + \mathbf{OM}'_v \cdot dv) = d\mathbf{OM}'_u \cdot du + d\mathbf{OM}'_v \cdot dv \\ &= (\mathbf{OM}''_{uu} \cdot du + \mathbf{OM}''_{uv} \cdot dv) \cdot du + (\mathbf{OM}''_{uv} \cdot du + \mathbf{OM}''_{vv} \cdot dv) \cdot dv \end{aligned}$$

soit :

$$d^2\mathbf{M} = \mathbf{OM}''_{uu} \cdot (du)^2 + 2 \cdot \mathbf{OM}''_{uv} \cdot du \cdot dv + \mathbf{OM}''_{vv} \cdot (dv)^2$$

car  $\mathbf{OM}''_{uv} = \mathbf{OM}''_{vu}$ . On peut écrire l'équation précédente sous la forme :

$$d^2\mathbf{M} = \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial u^2} du^2 + 2 \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial u \partial v} du dv + \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial v^2} dv^2 \quad (4.32)$$

Soit  $(\gamma)$  une courbe tracée sur la surface  $(\sigma)$ , définie par  $u = u(s), v = v(s)$  où  $s$  désigne l'abscisse curviligne. Soit  $\mathbf{n}$  le vecteur normal à la surface et  $\mathbf{N}$  le vecteur unitaire porté par la normale principale à la courbe  $(\gamma)$ . Si  $\mathbf{T}$  est le vecteur porté par la tangente à  $(\gamma)$  au point  $M(u, v)$ , d'après les formules de Frenét, on a :

$$\frac{d\mathbf{T}}{ds} = \frac{\mathbf{N}}{R}$$

où  $\frac{1}{R}$  est la courbure de  $(\gamma)$  au point  $M$ . Or  $d\mathbf{M} = \mathbf{T}ds$ , par suite :

$$d(d\mathbf{M}) = d^2\mathbf{M} = d(\mathbf{T}ds) = ds.d\mathbf{T} = ds.\left(\mathbf{N}\frac{ds}{R}\right) \quad (4.33)$$

On multiplie vectoriellement l'équation (4.32) par le vecteur normal unitaire  $\mathbf{n}$ , on obtient :

$$\mathbf{n}.d^2\mathbf{M} = \mathbf{n}.\frac{\partial^2\mathbf{M}}{\partial u^2}du^2 + 2\mathbf{n}.\frac{\partial^2\mathbf{M}}{\partial u\partial v}dudv + \mathbf{n}.\frac{\partial^2\mathbf{M}}{\partial v^2}dv^2 \quad (4.34)$$

On pose :

$$\boxed{\begin{cases} L = \mathbf{n}.\frac{\partial^2\mathbf{M}}{\partial u^2} \\ M = \mathbf{n}.\frac{\partial^2\mathbf{M}}{\partial u\partial v} \\ N = \mathbf{n}.\frac{\partial^2\mathbf{M}}{\partial v^2} \end{cases}} \quad (4.35)$$

(4.34) s'écrit alors :

$$\mathbf{n}.d^2\mathbf{M} = Ldu^2 + 2Mdudv + Ndv^2 \quad (4.36)$$

On multiplie aussi l'équation (4.33) par le vecteur  $\mathbf{n}$ , d'où :

$$\mathbf{n}.d^2\mathbf{M} = \mathbf{n}.ds.\left(\mathbf{N}\frac{ds}{R}\right) = \mathbf{n}.\mathbf{N}\frac{ds^2}{R}$$

Soit  $\theta$  l'angle formé par  $\mathbf{n}$  et  $\mathbf{N}$ , d'où :

$$\mathbf{n}.d^2\mathbf{M} = \mathbf{n}.\mathbf{N}\frac{ds^2}{R} = \frac{\cos\theta}{R}ds^2 \quad (4.37)$$

Comme (4.36) est égal à (4.37), on obtient :

$$\frac{\cos\theta}{R}ds^2 = Ldu^2 + 2Mdudv + Ndv^2 = \Phi(u, v)$$

soit :

$$\frac{\cos\theta}{R} = \frac{Ldu^2 + 2Mdudv + Ndv^2}{ds^2}$$

ou encore :

$$\boxed{\frac{\cos\theta}{R} = \frac{Ldu^2 + 2Mdudv + Ndv^2}{Edu^2 + 2Fdudv + Gdv^2} = \frac{II(u,v)}{I(u,v)}} \quad (4.38)$$

avec  $I(u,v)$  la première forme fondamentale et l'expression :

$$\boxed{II(u,v) = Ldu^2 + 2Mdudv + Ndv^2 = \Phi(u,v)} \quad (4.39)$$

est appelée **la deuxième forme fondamentale**. D'où :

**Théorème 4.1** *Le produit de la courbure en un point donné d'une courbe tracée sur une surface dans l'espace à trois dimensions par le cosinus de l'angle entre la normale à la surface et la normale principale à la courbe est égale au rapport de la deuxième et la première formes fondamentales du vecteur tangent à la courbe en ce point.*

**Définition 4.9** *La quantité  $\frac{\cos\theta}{R}$  invariante pour toutes les courbes ayant même vecteur tangent  $\mathbf{T}$  en un point donné est dite la courbure normale de la surface en ce point.*

**Proposition 4.1** *Si la courbe est la section d'une surface par un plan normal, on a :*

$$\boxed{\theta = 0 \text{ ou } \theta = \pi \Rightarrow \cos\theta = \pm 1 \Rightarrow \pm \frac{1}{R} = \frac{Ldu^2 + 2Mdudv + Ndv^2}{Edu^2 + 2Fdudv + Gdv^2}} \quad (4.40)$$

#### 4.5.1. Trièdre de Darboux<sup>3</sup> - Ribaucour<sup>4</sup>

Soit  $(\gamma)$  une courbe tracée sur une surface  $(\sigma)$  pour laquelle on sait définir en un point donné  $M$  le repère de Frénet  $(\mathbf{T}, \mathbf{N}, \mathbf{B})$ .

**Définition 4.10** *On appelle repère de Darboux - Ribaucour  $(\mathbf{T}, \mathbf{n}, \mathbf{g})$  le repère orthonormé formé par les vecteurs  $\mathbf{T}$ ,  $\mathbf{n}$  et le vecteur  $\mathbf{g} = \mathbf{T} \wedge \mathbf{n}$ .*

3. Jean Gaston Darboux (1842-1917) : mathématicien français.

4. Albert Ribaucour (1845-1893) : ingénieur et mathématicien français.

La position relative des deux repères est donnée par l'angle :

$$\theta = \widehat{\mathbf{N}, \mathbf{n}} \quad (4.41)$$

#### 4.5.2. Section Normale

**Définition 4.11** Soit la courbe  $(\gamma)$  tracée sur  $(\sigma)$  et définie comme intersection de  $(\sigma)$  et du plan passant par le point  $M$  et de directions  $\mathbf{n}$  et  $\mathbf{T}$ , alors  $(\gamma)$  est appelée section normale de  $(\sigma)$  en  $M$  dans la direction  $\mathbf{T}$ .

La normale principale de  $(\gamma)$  est la droite portée par le vecteur  $\mathbf{n}$ . Si  $R_n$  est le rayon de courbure de  $(\gamma)$  au point  $M$ , on a par définition :

$$\frac{d\mathbf{T}}{ds} = \frac{\mathbf{n}}{R_n}$$

par suite :

$$\mathbf{n} \cdot \frac{d\mathbf{T}}{ds} = \frac{1}{R_n}$$

or (4.33) donne :

$$d\mathbf{T} = \frac{d^2\mathbf{M}}{ds}$$

d'où :

$$\mathbf{n} \cdot \frac{d\mathbf{T}}{ds} = \mathbf{n} \cdot \frac{d^2\mathbf{M}}{ds^2} = \frac{1}{R_n} = \frac{II(u,v)}{I(u,v)}$$

soit :

$$\frac{1}{R_n} = \frac{Ldu^2 + 2Mdudv + Ndv^2}{Edu^2 + 2Fdudv + Gdv^2} = \frac{II(u,v)}{I(u,v)} \quad (4.42)$$

En comparant l'équation ci-dessus avec l'équation (4.38), on obtient :

$$\boxed{R = R_n \cdot \cos\theta} \quad (4.43)$$

D'où le deuxième théorème de Meusnier <sup>5</sup> :

**Théorème 4.2** Le rayon de courbure  $R$  d'une courbe  $(\gamma)$  tracée sur une surface  $(\sigma)$  et ayant même tangente de direction  $\mathbf{T}$  est égal au produit de  $R_n$  rayon de courbure de la section normale par le cosinus de l'angle  $\theta$  entre les vecteurs  $\mathbf{n}$  et  $\mathbf{N}$ .

---

5. **Jean Baptiste Meusnier** (1754-1793) : militaire, géomètre et mathématicien français.

### 4.5.3. Indicatrice de Dupin<sup>6</sup>

On considère le repère orthonormé  $\mathcal{R}$  au point  $M$  défini par les vecteurs :

$$\frac{1}{\sqrt{E}} \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} \quad \text{et} \quad \frac{1}{\sqrt{G}} \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v}$$

**Définition 4.12** *L'indicatrice de Dupin est l'ensemble des points  $P$  du plan tangent en  $M$  vérifiant :*

$$\mathbf{MP} = \sqrt{R_n} \mathbf{T} \quad (4.44)$$

quand  $\mathbf{T}$  varie autour de  $M$ .

Soit un point  $P(\alpha, \beta)$  dans  $\mathcal{R}$ , on a alors :

$$\begin{aligned} \mathbf{MP} &= \frac{\alpha}{\sqrt{E}} \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} + \frac{\beta}{\sqrt{G}} \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v} \\ \mathbf{MP} = \sqrt{R_n} \mathbf{T} &= \sqrt{R_n} \left( \frac{du}{ds} \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} + \frac{dv}{ds} \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v} \right) \end{aligned}$$

d'où :

$$\frac{du}{ds} = \frac{\alpha}{\sqrt{ER_n}} \quad \text{et} \quad \frac{dv}{ds} = \frac{\beta}{\sqrt{GR_n}}$$

En utilisant la deuxième forme quadratique, on a :

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_n} &= L \left( \frac{du}{ds} \right)^2 + 2M \frac{du}{ds} \frac{dv}{ds} + N \left( \frac{dv}{ds} \right)^2 \Rightarrow \\ \frac{1}{R_n} &= L \frac{\alpha^2}{ER_n} + 2M \frac{\alpha\beta}{R_n\sqrt{EG}} + N \frac{\beta^2}{GR_n} \end{aligned}$$

ou encore :

$$\boxed{\frac{L}{E}\alpha^2 + 2\frac{M}{\sqrt{EG}}\alpha\beta + \frac{N}{G}\beta^2 = 1} \quad (4.45)$$

C'est l'équation d'une conique (ellipse, parabole, hyperbole) suivant le signe du discriminant  $\frac{M^2 - LN}{EG}$  ou  $M^2 - LN$  respectivement (négatif, nul ou positif).

---

6. **Charles Dupin** (1784-1873) : ingénieur et mathématicien français.

#### 4.5.4. Les Directions principales

On suppose que  $M^2 - LN < 0$ .

**Définition 4.13** On appelle directions principales les directions des axes de symétrie de l'indicatrice de Dupin.

**Définition 4.14** On appelle les rayons de courbure principaux  $R_1$  et  $R_2$  les rayons de courbure normale dans les deux directions principales.

Les directions principales sont orthogonales.

#### 4.5.5. Formule d'Euler<sup>7</sup>

En supposant que l'indicatrice de Dupin est une ellipse d'équation :

$$\frac{\alpha^2}{a^2} + \frac{\beta^2}{b^2} = 1 \quad (4.46)$$

où  $a, b$  sont les 2 rayons de courbure normale principaux, on peut écrire :

$$\mathbf{MP} = \sqrt{R_n} \mathbf{T} = \mathbf{i} \sqrt{R_n} \cos \psi + \mathbf{j} \sqrt{R_n} \sin \psi$$

avec  $\psi = \widehat{\mathbf{T}, \mathbf{i}}$ , or :  $\mathbf{MP} = \alpha \mathbf{i} + \beta \mathbf{j}$ , avec l'équation (4.46), on obtient alors la formule d'Euler :

$$\frac{R_n \cos^2 \psi}{a^2} + \frac{R_n \sin^2 \psi}{b^2} = 1 \Rightarrow \frac{1}{R_n} = \frac{\cos^2 \psi}{a^2} + \frac{\sin^2 \psi}{b^2}$$

D'où :

**Théorème 4.3 (Formule d'Euler)** : La courbure de la section normale  $\frac{1}{R_n}$  en un point donné est égale à :

$$\boxed{\frac{1}{R_n} = \frac{\cos^2 \psi}{a^2} + \frac{\sin^2 \psi}{b^2}} \quad (4.47)$$

7. Leonhard Euler (1707-1783) : mathématicien et physicien suisse.

où  $\frac{1}{a^2}, \frac{1}{b^2}$  sont les courbures principales au point considéré et  $\psi$  l'angle sur la surface entre le vecteur tangent à la section normale et la direction principale correspondante.

**Définition 4.15** *Le produit des courbures principales est la courbure de Gauss<sup>8</sup> ou courbure totale de la surface et la courbure moyenne la somme des courbures principales.*

Pour la première forme fondamentale  $ds^2$ , on a déjà noté (4.20) :

$$g = \begin{pmatrix} E & F \\ F & G \end{pmatrix}$$

et concernant la deuxième forme fondamentale  $\Phi(u, v)$  donnée par l'équation (4.39), elle peut s'écrire sous la forme :

$$\Phi = \Phi(u, v) = (du, dv) \cdot \begin{pmatrix} L & M \\ M & N \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} du \\ dv \end{pmatrix} \quad (4.48)$$

où par abus de notation, on a noté par  $\Phi$  la matrice ci-dessus.

Alors, on annonce les deux théorèmes suivants sans les démontrer (*B. Doubrovine - S. Novikov - A. Fomenko, 1982*) :

**Théorème 4.4** *La courbure totale  $K$  en un point d'une surface est égale au rapport des déterminants de ses deuxième et première formes fondamentales :*

$$K = \frac{\text{Dét}\Phi}{\text{Dét}g} = \frac{LN - M^2}{EG - F^2} \quad (4.49)$$

et :

**Théorème 4.5** *La courbure moyenne  $H$  en un point d'une surface est égale à la trace de la matrice  $g^{-1} \cdot \Phi$  :*

$$H = \text{Tr}(g^{-1} \cdot \Phi) \quad (4.50)$$

**Note historique :** *La théorie des surfaces élaborée par Gauss était surtout influencée essentiellement par son travail comme géomètre topographe dans le*

---

8. **Carl Friedrich Gauss** (1777-1855) : mathématicien et géomètre prussien, fondateur de la théorie des surfaces.

Royaume de Hannover au Nord de l'Allemagne durant la période 1821-1825. En 1822, il présenta son mémoire intitulé " *General solution of the problem of mapping parts of a given surface onto another given surface in such a way that image and pre-image become similar in their smallest parts*", à la Société Royale des Sciences à Copenhague (Danemark) où il recevait un prix officiel.

Où se réside donc l'importance de son mémoire ? Ce dernier concernait l'étude du problème de cartographier une surface sur une autre en satisfaisant certaines propriétés. C'est le problème de base de la cartographie. Parmi les représentations planes dites abusivement projections sont celles qui conservent les angles ou représentations conformes. Elles ont un aspect pratique pour la navigation maritime. Ainsi, Gauss avait réussi à trouver une procédure pour déterminer toutes les représentations conformes localement pour les surfaces analytiques. Il ajouta dans le titre de son mémoire cette phrase en latin :

*Ab his via sterniture ad maiora.*

soit " **De là, le chemin de quelque chose plus importante est préparé** ". En effet, Gauss présentait en octobre 1827 une théorie générale des surfaces à travers son papier " *Disquisitiones generales circa superficies curvas*<sup>9</sup> " (*Investigations about curved surfaces*). L'important résultat de son papier est le théorème egregium dit encore le théorème merveilleux. Ce dernier dit que la courbure de Gauss est une propriété intrinsèque pour les surfaces de dimension 2. La courbure de Gauss dépend des composantes  $g_{ij}$  du tenseur métrique et de ses dérivées partielles premières et secondes par rapport aux coordonnées locales. (E. Zeidler, 2011)

## 4.6 Exercices et Problèmes

**Exercice 4.1** Soit  $(\Gamma)$  la surface paramétrée par  $(u, v)$  dans  $\mathbb{R}^2$  telle que :

$$M(u, v) \begin{cases} X = u(1 - u^2)\cos v \\ Y = u(1 - u^2)\sin v \\ Z = 1 - u^2 \end{cases}$$

1. Calculer l'expression de  $ds^2$ .
2. Montrer que l'équation cartésienne de  $(\Gamma)$  est :

---

9. Voir aussi (P. Dombrowski, 1979).

$$x^2 + y^2 = (1 - z)z^2$$

**Exercice 4.2** Soit la surface d'Enneper<sup>10</sup> :

$$M(u, v) \begin{cases} X = u - \frac{u^3}{3} + uv^2 \\ Y = v - \frac{v^3}{3} + vu^2 \\ Z = u^2 - v^2 \end{cases}$$

1. Montrer que :

$$ds^2 = (1 + u^2 + v^2)^2 \cdot (du^2 + dv^2)$$

2. Calculer un vecteur unitaire normal à la surface.

3. Montrer que la surface d'Enneper est de courbure moyenne nulle en chaque point.

**Exercice 4.3** On suppose que la métrique d'une surface donnée est :

$$ds^2 = A^2 du^2 + B^2 dv^2, \quad A = A(u, v), \quad B = B(u, v)$$

1. Montrer alors que l'expression de la courbure totale est :

$$K = -\frac{1}{AB} \left[ \left( \frac{A'_v}{B} \right)'_v + \left( \frac{B'_u}{A} \right)'_u \right]$$

' désigne la dérivation partielle.

**Problème 4.1** Soit l'ellipse ( $E$ ) définie par les équations paramétriques :

$$M \begin{cases} x = a \cos u \\ y = b \sin u \\ \text{avec } a > b > 0 \end{cases}$$

On pose :

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}; \quad e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2}$$

1. Calculer la position sur l'axe des abscisses des deux points  $F$  et  $F'$  appelés foyers tels que  $MF + MF' = 2a$ .

2. Montrer que le produit des distances des foyers à la tangente à l'ellipse en  $M$  est indépendant de  $u$ .

---

10. Surface paramétrée par le mathématicien allemand **Alfred Enneper** (1830-1885).

3. Donner l'expression de  $ds$ .
4. Déterminer les expressions des vecteurs unitaires  $\mathbf{T}$  et  $\mathbf{N}$  et en déduire le rayon de courbure de l'ellipse.
5. Montrer qu'il passe par  $M$  deux cercles tangents en ce point à la courbe et centrés sur  $Ox, Oy$  respectivement (appelés cercles surosculateurs).
6. Que deviennent ces cercles lorsque  $M$  est un sommet de l'ellipse.

**Problème 4.2** Soit la courbe  $(C)$  définie par les formules :

$$M \begin{cases} x = at^2 \\ y = at^3 \\ z = \frac{9}{16}at^4 \end{cases} \text{ avec } a > 0$$

1. Calculer l'abscisse curviligne  $s$  d'un point  $M$  quelconque de cette courbe lorsqu'on prend pour origine des arcs l'origine des coordonnées et qu'on prend pour sens des arcs croissants celui des  $y$  croissants.
2. Déterminer au point  $M$  les vecteurs unitaires du trièdre de Frenêt.
3. Calculer le rayon de courbure et les coordonnées du centre de courbure.
4. Evaluer la torsion en  $M$ .

**Problème 4.3** On définit une surface  $(S)$  par les équations :

$$M(u, v) \begin{cases} X = u^2 + v \\ Y = u + v^2 \\ Z = uv \end{cases}$$

1. Calculer les composantes des vecteurs  $\mathbf{OM}'_u$  et  $\mathbf{OM}'_v$ .
2. Calculer les coefficients  $E, F, G$  de la première forme fondamentale de la surface  $(S)$ .
3. En déduire l'expression de  $ds^2$ .
4. Les coordonnées  $(u, v)$  sont-elles orthogonales ? symétriques ?
5. Calculer un vecteur normal de  $(S)$ .

**Problème 4.4** On définit une surface  $(\Sigma)$  par les équations :

$$M(u,v) \begin{cases} X = a.\cos u.\cos v \\ Y = a.\cos u.\sin v \\ Z = b.\sin u \end{cases}$$

avec  $a, b$  deux constantes positives.

1. Calculer les composantes des vecteurs  $\mathbf{OM}'_u$  et  $\mathbf{OM}'_v$ .
2. Calculer les coefficients  $E, F, G$  de la première forme fondamentale de la surface  $(\Sigma)$ .
3. En déduire l'expression de  $ds^2$ .
4. Les coordonnées  $(u, v)$  sont-elles orthogonales ? symétriques ?
5. Calculer un vecteur unitaire normal  $\mathbf{n}$  de  $(\Sigma)$ .
6. Calculer les vecteurs :

$$\mathbf{OM}''_{uu}, \quad \mathbf{OM}''_{uv}, \quad \mathbf{OM}''_{vv}$$

On pose :

$$L = \mathbf{n} \cdot \mathbf{OM}''_{uu}, \quad M = \mathbf{n} \cdot \mathbf{OM}''_{uv}, \quad N = \mathbf{n} \cdot \mathbf{OM}''_{vv}$$

7. Calculer les coefficients  $L, M$  et  $N$ .

**Problème 4.5** On considère la surface  $(\Gamma)$  définie par les équations :

$$M(u,v) \begin{cases} X = \sin u.\cos v \\ Y = \sin u.\sin v \\ Z = \cos u + \text{Log}tg \frac{u}{2} + \psi(v) \end{cases}$$

avec  $\psi(v)$  est une fonction définie de classe  $C^1$  de  $v$ .

1. Donner le domaine de définition de la surface  $(\Gamma)$ .
2. Montrer que les courbes coordonnées  $v = \text{constante}$  constituent une famille de courbes planes de  $(\Gamma)$  et que leur plan coupe  $(\Gamma)$  sous un angle constant.
3. Calculer les composantes des vecteurs  $\mathbf{OM}'_u$  et  $\mathbf{OM}'_v$ .
4. Calculer les coefficients  $E, F, G$  de la première forme fondamentale de la surface  $(\Gamma)$ .
5. En déduire l'expression de  $ds^2$ .
6. Les coordonnées  $(u, v)$  sont-elles orthogonales ? symétriques ?

7. On suppose pour la suite que  $\psi(v) = 0$ , calculer un vecteur unitaire normal  $\mathbf{n}$  de  $\Gamma$ .

8. Calculer les vecteurs :

$$\mathbf{OM}''_{uu}, \quad \mathbf{OM}''_{uv}, \quad \mathbf{OM}''_{vv}$$

On pose :

$$L = \mathbf{n} \cdot \mathbf{OM}''_{uu}, \quad M = \mathbf{n} \cdot \mathbf{OM}''_{uv}, \quad N = \mathbf{n} \cdot \mathbf{OM}''_{vv}$$

9. Calculer les coefficients  $L, M$  et  $N$ .

10. En déduire l'expression des courbures moyenne et totale.

**Problème 4.6** Soit la surface ( $\Gamma$ ) définie paramétriquement par :

$$M(u, v) \begin{cases} X = thu \cdot \cos v \\ Y = thu \cdot \sin v \\ Z = \frac{1}{chu} + \text{Logth} \frac{u}{2} \end{cases}$$

avec  $chu$  et  $thu$  sont respectivement le cosinus et la tangente hyperboliques définies par :

$$chu = \frac{e^u + e^{-u}}{2}, \quad thu = \frac{e^u - e^{-u}}{e^u + e^{-u}}$$

1. Donner le domaine de définition de la surface ( $\Gamma$ ).

2. Calculer les composantes des vecteurs  $\mathbf{OM}'_u$  et  $\mathbf{OM}'_v$ .

3. Calculer les coefficients  $E, F, G$  de la première forme fondamentale de la surface ( $\Gamma$ ).

4. En déduire l'expression de  $ds^2$ .

5. Les coordonnées  $(u, v)$  sont-elles orthogonales ? symétriques ?

6. Calculer un vecteur unitaire normal  $\mathbf{n}$  de ( $\Gamma$ ).

7. Calculer les vecteurs :

$$\mathbf{OM}''_{uu}, \quad \mathbf{OM}''_{uv}, \quad \mathbf{OM}''_{vv}$$

On pose :

$$L = \mathbf{n} \cdot \mathbf{OM}''_{uu}, \quad M = \mathbf{n} \cdot \mathbf{OM}''_{uv}, \quad N = \mathbf{n} \cdot \mathbf{OM}''_{vv}$$

8. Calculer les coefficients  $L, M$  et  $N$ .

9. Déterminer les courbures moyenne et totale.

**Problème 4.7** Montrer que les courbures totale  $K$  et moyenne  $H$  en un point  $M(x, y, z)$  d'une surface paramétrée par  $z = f(x, y)$ , où  $f$  est une fonction lisse, sont données par :

$$K = \frac{f''_{xx}f''_{yy} - f''_{xy}^2}{(1 + f'^2_x + f'^2_y)^2}$$

et :

$$H = \frac{(1 + f'^2_x)f''_{xx} - 2f'_xf'_yf''_{xy} + (1 + f'^2_x)f''_{yy}}{(1 + f'^2_x + f'^2_y)^{\frac{3}{2}}}$$

**Problème 4.8** Soit  $(\Sigma)$  une surface de  $\mathbb{R}^3$  paramétrée par  $OM(u, v)$  telle que sa première forme fondamentale s'écrit :  $ds^2 = Edu^2 + 2Fdu dv + Gdv^2$

1. Montrer que les conditions suivantes sont équivalentes :

i) -  $\frac{\partial E}{\partial v} = \frac{\partial G}{\partial u} = 0,$

ii) - le vecteur  $\frac{\partial^2 OM}{\partial u \partial v}$  est parallèle au vecteur normal  $N$  à la surface,

iii) - les côtés opposés de tout quadrilatère curviligne formés par les courbes coordonnées  $(u, v)$  ont même longueurs.

2. Quand ces conditions sont satisfaites, on dit que les courbes coordonnées de  $(\Sigma)$  forment un réseau de Tchebychev.<sup>11</sup> Montrer que dans ce cas, on peut paramétrer la surface par  $(\tilde{u}, \tilde{v})$  telle que  $ds^2$  s'écrit :

$$ds^2 = d\tilde{u}^2 + 2\cos\theta d\tilde{u}d\tilde{v} + d\tilde{v}^2$$

où  $\theta$  est une fonction de  $(\tilde{u}, \tilde{v})$ . Montrer que  $\theta$  est l'angle entre les courbes coordonnées  $\tilde{u}, \tilde{v}$ .

3. Montrer que l'expression de la courbure totale est donnée par :

$$K = \frac{1}{\sin\theta} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial \tilde{u} \partial \tilde{v}}$$

4. On pose :

$$\begin{aligned} \hat{u} &= \tilde{u} + \tilde{v} \\ \hat{v} &= \tilde{u} - \tilde{v} \end{aligned}$$

Montrer que  $ds^2$  s'écrit avec les nouvelles variables  $(\hat{u}, \hat{v})$  :

$$ds^2 = \cos^2\omega d\hat{u}^2 + \sin^2\omega d\hat{v}^2$$

avec  $\omega = \theta/2$ . (A.N. Pressley, 2010)

11. Pafnouti Tchebychev (1821 - 1894) : mathématicien russe.

**Problème 4.9** Soit  $(\mathcal{F})$  une surface définie dans  $\mathbb{R}^3$ , paramétrée par la fonction vectorielle  $\mathbf{OM} = F(u, v)$  telle que :

$$F(u, v) \begin{cases} x = F_1(u, v) \\ y = F_2(u, v) \\ z = F_3(u, v) \end{cases}$$

$F$  est dite une paramétrisation conforme de  $(\mathcal{F})$  si on a les deux conditions suivantes :

$$\frac{\partial F}{\partial u} \cdot \frac{\partial F}{\partial u} = \frac{\partial F}{\partial v} \cdot \frac{\partial F}{\partial v} = e^{\Phi(u, v)} \quad \text{et} \quad \frac{\partial F}{\partial u} \cdot \frac{\partial F}{\partial v} = 0$$

1. Ecrire la première forme fondamentale de  $(\mathcal{F})$ .

2. Soit  $n$  Le vecteur normal unitaire.

$$n = \frac{\frac{\partial F}{\partial u} \wedge \frac{\partial F}{\partial v}}{\left\| \frac{\partial F}{\partial u} \wedge \frac{\partial F}{\partial v} \right\|}$$

Quand le point  $M$  varie sur la surface  $(\mathcal{F})$ , le repère  $(\frac{\partial F}{\partial u}, \frac{\partial F}{\partial v}, n)$  est un repère mobile. La deuxième forme fondamentale de  $(\mathcal{F})$  est définie par :

$$n \cdot d^2 F = L du^2 + 2M dudv + N dv^2$$

Si cette deuxième forme fondamentale s'écrit sous la forme :

$$-n \cdot d^2 F = e^{\Phi(u, v)} \left( \frac{du^2}{\rho_1} + \frac{dv^2}{\rho_2} \right)$$

alors, la paramétrisation de  $(\mathcal{F})$  est dite isotherme. Dans ce cas,  $\rho_1, \rho_2$  sont les rayons de courbure principaux de la surface  $(\mathcal{F})$ . Une surface qui admet des coordonnées isothermes est dite isotherme.

3. On considère que  $(\mathcal{F})$  est la sphère définie par :  $M = \begin{cases} x = R \cos \varphi \cos \lambda \\ y = R \cos \varphi \sin \lambda \\ z = R \sin \varphi \end{cases} \quad R > 0$

Soit  $\mathcal{L}_M$  la variable de Mercator. Montrer que la sphère paramétrée par  $(\mathcal{L}_M, \lambda)$  est une surface isotherme.

4. On considère  $\mathcal{B}$  la base du repère mobile  $(\frac{\partial F}{\partial u}, \frac{\partial F}{\partial v}, n)$ . Exprimer les dérivées partielles  $\frac{\partial}{\partial u}$  et  $\frac{\partial}{\partial v}$  des vecteurs de  $\mathcal{B}$  dans  $\mathcal{B}$ , en tenant compte que la surface est isotherme c'est-à-dire qu'on a l'équation :

$$-n.d^2F = e^{\Phi(u,v)} \left( \frac{du^2}{\rho_1} + \frac{dv^2}{\rho_2} \right) = -(L.du^2 + 2Mdu.dv + N.dv^2)$$

5. Montrer qu'on peut écrire les résultats de 4. sous la forme matricielle suivante :

$$\frac{\partial}{\partial u} \begin{pmatrix} F'_u \\ F'_v \\ n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\Phi'_u}{2} & \frac{-\Phi'_v}{2} & -\frac{e^\Phi}{\rho_1} \\ \frac{\Phi'_v}{2} & \frac{\Phi'_u}{2} & 0 \\ \frac{1}{\rho_1} & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F'_u \\ F'_v \\ n \end{pmatrix}$$

et :

$$\frac{\partial}{\partial v} \begin{pmatrix} F'_u \\ F'_v \\ n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\Phi'_v}{2} & \frac{\Phi'_u}{2} & 0 \\ -\frac{\Phi'_u}{2} & \frac{\Phi'_v}{2} & -\frac{e^\Phi}{\rho_2} \\ 0 & \frac{1}{\rho_2} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F'_u \\ F'_v \\ n \end{pmatrix}$$

Les deux dernières expressions ci-dessus sont appelées les équations de Gauss-Weingarten<sup>12</sup> de la surface ( $\mathcal{F}$ ).

---

12. **Julius Weingarten** (1836 - 1910) : mathématicien allemand.



# Chapitre 5

## Géométrie de l'Ellipse et de l'Ellipsoïde

### 5.1 Géométrie de l'Ellipse

#### 5.1.1. Définitions

**Définition 5.1** *L'ellipse est le lieu des points dont la somme des distances à deux points fixes ou foyers est constante :*

$$MF + MF' = \text{constante} = 2a \quad (5.1)$$

où  $a$  est dit le demi-grand axe de l'ellipse (**Fig. 5.1**).

**Définition 5.2** *Une ellipse est la transformée par affinité d'un cercle dans le rapport  $b/a$  où  $b$  est le demi-petit axe (**Fig. 5.2**).*

Au point  $M' \in \text{cercle} \implies M \in \text{ellipse}$  avec :

$$HM = \frac{b}{a} HM' \quad (5.2)$$

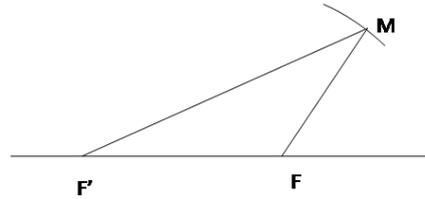


Fig. 5.1 Définition de l'ellipse

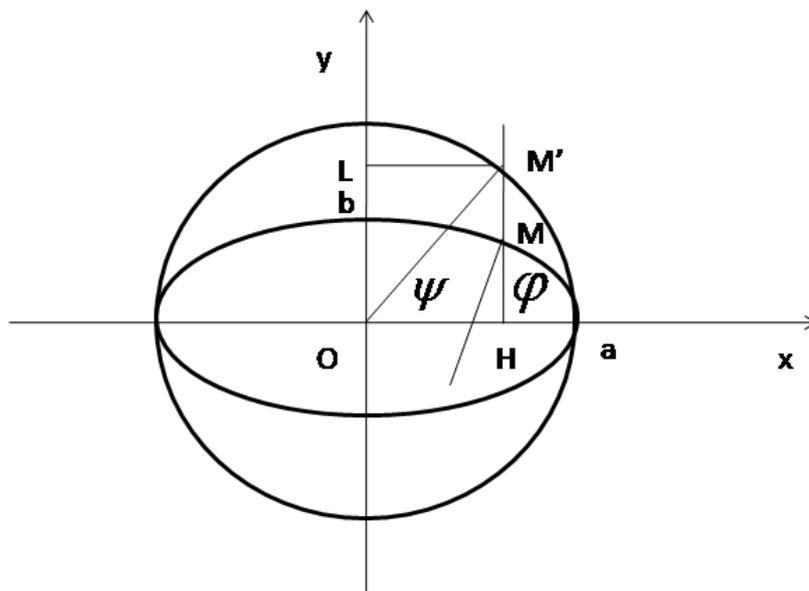


Fig. 5.2 L'affinité

Soit  $\psi$  l'angle  $\widehat{HOM'}$ ,  $\psi$  est dite latitude paramétrique ou réduite, d'où les coordonnées de  $M'$  :

$$\begin{aligned}x &= OH = OM' \cos \psi \\y &= OL = OM' \sin \psi\end{aligned}$$

Par suite, les coordonnées de  $M$  sur l'ellipse sont :

$$\begin{cases} x = OH = a \cos \psi \\ y = OL = \frac{b}{a} HM' = \frac{b}{a} a \sin \psi = b \sin \psi \end{cases} \quad (5.3)$$

Dans le système d'axes  $Ox, Oy$ , l'équation de l'ellipse s'écrit :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

On appelle respectivement aplatissement, le carré de la première excentricité et le carré de la deuxième excentricité les quantités :

$$\boxed{\alpha = \frac{a-b}{a}, \quad e^2 = \frac{a^2-b^2}{a^2}, \quad e'^2 = \frac{a^2-b^2}{b^2}} \quad (5.4)$$

## 5.2 Equations paramétriques de l'ellipse

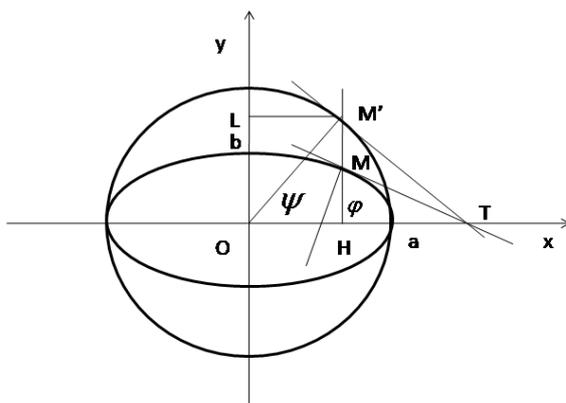
Les équations (5.3) représentent les équations paramétriques de l'ellipse en fonction de la latitude  $\psi$ . On va exprimer ces équations en fonction de l'angle  $\varphi$  de la normale en  $M$  avec l'axe  $Ox$ .

Soit  $TM'$  la tangente en  $M'$  au cercle de rayon  $a$ , le point  $T$  est l'intersection de cette tangente avec l'axe  $Ox$ . La transformée de cette tangente par affinité de rapport  $b/a$  de cette tangente est la droite tangente à l'ellipse au point  $M$  et elle passe par  $T$  (**Fig. 5.3**).

Dans le triangle  $MHT$ , on a :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{HT}{MH}$$

et dans le triangle  $M'HT$ , on a :



**Fig. 5.3** La relation entre  $\varphi$  et  $\psi$

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{HT}{M'H}$$

d'où :

$$\frac{\operatorname{tg}\psi}{\operatorname{tg}\varphi} = \frac{HT}{M'H} \frac{MH}{HT} = \frac{MH}{M'H} = \text{rapport de l'affinité} = \frac{b}{a}$$

Soit :

$$\boxed{\operatorname{tg}\psi = \frac{b}{a} \operatorname{tg}\varphi} \quad (5.5)$$

De (5.5), on exprime  $\cos\psi$  et  $\sin\psi$  en fonction de l'angle  $\varphi$ , d'où :

$$\frac{1}{\cos^2\psi} = 1 + \operatorname{tg}^2\psi = 1 + (b/a)^2 \operatorname{tg}^2\varphi = \frac{a^2 \cos^2\varphi + b^2 \sin^2\varphi}{a^2 \cos^2\varphi}$$

D'où :

$$\cos^2\psi = \frac{a^2 \cos^2\varphi}{a^2 \cos^2\varphi + b^2 \sin^2\varphi}$$

On pose :

$$W^2 = \frac{a^2 \cos^2\varphi + b^2 \sin^2\varphi}{a^2} = 1 - e^2 \sin^2\varphi \quad (5.6)$$

d'où :

$$W = \frac{\cos\varphi}{\cos\psi} \quad (5.7)$$

On calcule de même  $\sin\psi$  :

$$\sin^2\psi = 1 - \cos^2\psi = 1 - \frac{a^2\cos^2\varphi}{a^2\cos^2\varphi + b^2\sin^2\varphi}$$

soit :

$$\sin^2\psi = \frac{b^2\sin^2\varphi}{a^2\cos^2\varphi + b^2\sin^2\varphi} \quad (5.8)$$

On pose :

$$V^2 = \frac{a^2\cos^2\varphi + b^2\sin^2\varphi}{b^2} = 1 - e'^2\cos^2\varphi \quad (5.9)$$

avec  $e'$  la 2ème excentricité, d'où :

$$V = \frac{\sin\varphi}{\sin\psi} = \frac{a}{b}W \quad (5.10)$$

Alors les équations paramétriques de l'ellipse en fonction de  $\varphi$  sont :

$$X = a\cos\psi = a\frac{\cos\varphi}{W} = a\frac{\cos\varphi}{\sqrt{1 - e^2\sin^2\varphi}} \quad (5.11)$$

$$Y = b\sin\psi = \frac{b\sin\varphi}{V} = \frac{b^2\sin\varphi}{a\sqrt{1 - e^2\sin^2\varphi}} = a(1 - e^2)\frac{\sin\varphi}{\sqrt{1 - e^2\sin^2\varphi}} \quad (5.12)$$

Soit :

$$\boxed{\begin{aligned} X &= a\frac{\cos\varphi}{\sqrt{1 - e^2\sin^2\varphi}} \\ Y &= a(1 - e^2)\frac{\sin\varphi}{\sqrt{1 - e^2\sin^2\varphi}} \end{aligned}} \quad (5.13)$$

### 5.2.1. Relations différentielles entre $\varphi$ et $\psi$

A partir de la relation (5.5), on obtient :

$$\frac{d\psi}{\cos^2\psi} = \frac{bd\varphi}{a\cos^2\varphi} \implies \frac{d\psi}{d\varphi} = \frac{b\cos^2\psi}{a\cos^2\varphi} \quad (5.14)$$

et en utilisant (5.7), on a :

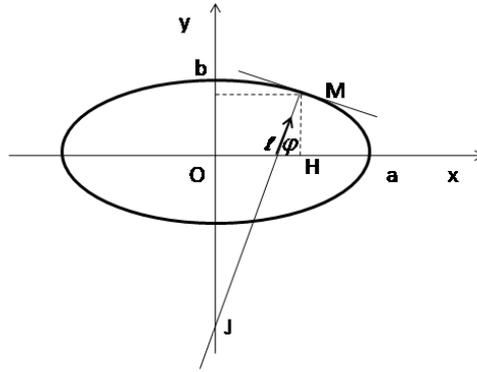
$$\boxed{\frac{d\psi}{d\varphi} = \frac{b}{aW^2} = \frac{b}{a(1 - e^2\sin^2\varphi)}} \quad (5.15)$$

### 5.3 Calcul de la grande normale

**Définition 5.3** On appelle la grande normale la longueur de  $JM$ .  $JM$  est porté par la normale à l'ellipse au point  $M$ . La normale a pour vecteur de direction, le vecteur  $\mathbf{l}$  de composantes  $(\cos\varphi, \sin\varphi)$  (**Fig. 5.4**).

D'où l'équation cartésienne de la normale :

$$\frac{X - X_M}{\cos\varphi} = \frac{Y - Y_M}{\sin\varphi} \quad (5.16)$$



**Fig. 5.4** La grande normale

On obtient l'ordonnée de  $J$  en faisant  $X = 0$  dans (5.16), d'où :

$$\frac{-X_M}{\cos\varphi} = \frac{Y - Y_M}{\sin\varphi} \implies Y_J = Y_M - X_M \operatorname{tg}\varphi$$

Par suite, la distance  $MJ$  est égale à :

$$MJ = \sqrt{(Y_J - Y_M)^2 + X_M^2} = \sqrt{X_M^2 \operatorname{tg}^2\varphi + X_M^2} = X_M \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\varphi}$$

Soit :

$$MJ = \frac{X_M}{\cos\varphi}$$

Or :

$$X_M = \frac{a \cos \varphi}{W} \implies MJ = \frac{a \cos \varphi}{W \cos \varphi} = \frac{a}{W} = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$$

On pose :

$$\boxed{N(\varphi) = MJ = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}} \quad (5.17)$$

$N$  est appelé *la grande normale*.

Les équations paramétriques de l'ellipse (5.3) deviennent :

$$\begin{aligned} X &= a \cos \psi = a \frac{\cos \varphi}{W} = a \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} = N(\varphi) \cos \varphi \\ Y &= b \sin \psi = b \frac{\sin \varphi}{V} = a(1 - e^2) \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} = (1 - e^2) N(\varphi) \sin \varphi \end{aligned}$$

Soit :

$$\boxed{\begin{aligned} X &= a \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} = N(\varphi) \cos \varphi \\ Y &= a(1 - e^2) \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} = (1 - e^2) N(\varphi) \sin \varphi \end{aligned}} \quad (5.18)$$

### 5.3.1. Arc élémentaire $ds$ et rayon de courbure $\rho$ de l'ellipse

L'arc élémentaire  $ds$  se calcule à partir des équations paramétriques de l'ellipse par :

$$\begin{aligned} ds^2 &= dX^2 + dY^2 = a^2 \sin^2 \psi d\psi^2 + b^2 \cos^2 \psi d\psi^2 \\ \text{ou } ds^2 &= (a^2 \sin^2 \psi + b^2 \cos^2 \psi) d\psi^2 \end{aligned}$$

En utilisant les équations (5.7) et (5.10), on obtient :

$$ds = \frac{b}{W} \cdot d\psi$$

Et en remplaçant  $d\psi$  en utilisant (5.15), on trouve :

$$ds = a(1 - e^2) \frac{d\varphi}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}}$$

La longueur de l'arc de méridien comptée depuis l'équateur est :

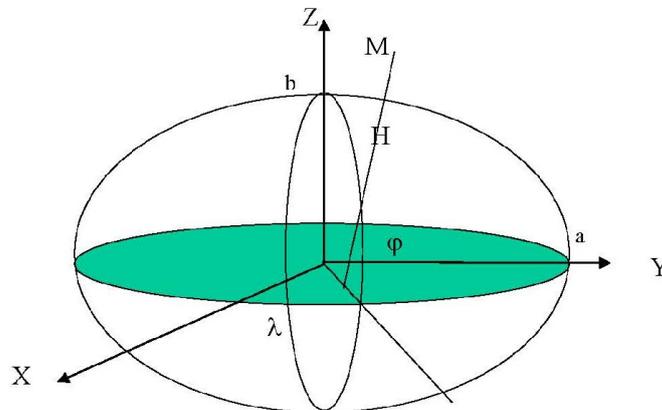
$$s(\varphi) = \int_0^\varphi ds = a(1-e^2) \int_0^\varphi \frac{dt}{(1-e^2 \sin^2 t)^{3/2}} \quad (5.19)$$

L'intégration se fait à partir d'un développement limité de  $(1 - e^2 \sin^2 t)^{-3/2}$  (Voir plus loin). Le rayon de courbure  $\rho$  de l'ellipse s'obtient à partir de  $ds$  par :

$$\rho = \frac{ds}{d\varphi} = \frac{b^2}{aW^3} = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}} \quad (5.20)$$

#### 5.4 Géométrie de l'Ellipsoïde de Révolution

On va étudier les propriétés de l'ellipsoïde de révolution obtenu par la rotation d'une ellipse autour du demi-petit axe comme le montre la figure ci-dessous (**Fig. 5.5**) :



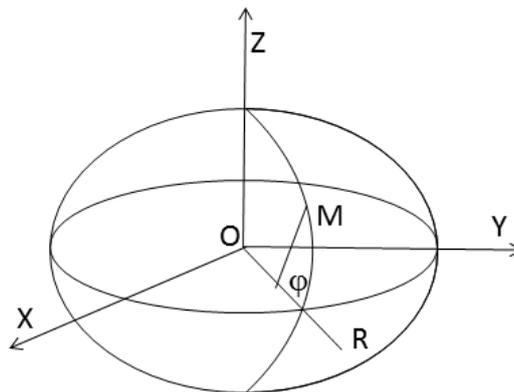
**Fig. 5.5** L'ellipsoïde de révolution : ellipsoïde de référence

### 5.4.1. Les Coordonnées Géographiques

Les coordonnées géographiques définies sur l'ellipsoïde de révolution sont :

- la longitude  $\lambda$  : angle du plan méridien du point M avec le plan méridien origine, dans notre cas, le plan origine est le plan  $XOZ$ ,
- la latitude  $\varphi$  : angle de la direction de la normale au point M avec le plan équatorial;
- l'altitude ellipsoïdique  $he$  : si le point est sur l'ellipsoïde  $he = 0$ .

Dans le plan  $ROZ$  (**Fig. 5.6**) avec  $\mathbf{r}$  et  $\mathbf{k}$  les vecteurs unitaires des axes  $OR$  et  $OZ$ , on peut écrire :



**Fig. 5.6** Calcul des coordonnées géodésiques

$$\begin{aligned} \mathbf{OM} &= a \cos \psi \mathbf{r} + b \sin \psi \mathbf{k} \\ \text{et } \mathbf{r} &= \cos \lambda \mathbf{i} + \sin \lambda \mathbf{j} \end{aligned}$$

D'où :

$$\mathbf{OM} = a \cos \psi \cos \lambda \mathbf{i} + a \cos \psi \sin \lambda \mathbf{j} + b \sin \psi \mathbf{k}$$

Donc, les équations paramétriques du point M sont :

$$\begin{aligned} X &= a \cos \psi \cos \lambda \\ Y &= a \cos \psi \sin \lambda \end{aligned}$$

$$Z = b \sin \psi$$

Et en exprimant  $\psi$  en fonction de  $\varphi$ , on a :

$$\begin{aligned} X &= a \cos \psi \cos \lambda = \frac{a \cos \varphi}{W} \cos \lambda = N \cos \varphi \cos \lambda \\ Y &= a \cos \psi \sin \lambda = N \cos \varphi \sin \lambda \\ Z &= b \sin \psi = \frac{b^2 \sin \varphi}{a \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} = N(1 - e^2) \sin \varphi \end{aligned}$$

Soit :

$$\begin{cases} X = N \cos \varphi \cos \lambda \\ Y = N \cos \varphi \sin \lambda \\ Z = N(1 - e^2) \sin \varphi \end{cases} \quad (5.21)$$

Si  $he \neq 0$ , alors les coordonnées de  $M$  sont :

$$\begin{cases} X = (N + he) \cos \varphi \cos \lambda \\ Y = (N + he) \cos \varphi \sin \lambda \\ Z = (N(1 - e^2) + he) \sin \varphi \end{cases} \quad (5.22)$$

#### 5.4.2. Passage des coordonnées tridimensionnelles

$(X, Y, Z)$  aux coordonnées  $(\varphi, \lambda, he)$

Des deux premières équations de (5.22) et ne pas tenir compte du cas particulier ( $X = 0$ ), on obtient :

$$\boxed{tg \lambda = \frac{Y}{X} \implies \lambda = \text{Arctg} \frac{Y}{X}} \quad (5.23)$$

De même, on pose :

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2} = (N + he) \cos \varphi$$

De (5.22), on peut écrire :

$$Z = (N + he) \sin \varphi - Ne^2 \sin \varphi \quad (5.24)$$

soit :

$$Z = Z' - Ne^2 \sin \varphi$$

en posant :

$$Z' = (N + he)\sin\varphi \quad (5.25)$$

Le calcul de  $\varphi$  se fait par itérations : 1ère itération :

$$Z' = Z \Rightarrow \operatorname{tg}\varphi = \frac{Z'}{r} \Rightarrow \varphi_1 = \operatorname{Arctg}\frac{Z'}{r} \quad (5.26)$$

2ème itération :  $N = a(1 - e^2 \sin^2 \varphi_1)^{-1/2}$ ,  $Z' = Z + Ne^2 \cdot \sin\varphi_1$  et :

$$\varphi_2 = \operatorname{Arctg}(Z'/r).$$

3ème itération :  $N = a(1 - e^2 \sin^2 \varphi_2)^{-1/2}$ ,  $Z' = Z + Ne^2 \cdot \sin\varphi_2$  et :

$$\varphi_3 = \operatorname{Arctg}(Z'/r).$$

En général, 3 à 4 itérations suffisent et on obtient :

$$\boxed{\varphi = \varphi_3} \quad (5.27)$$

Par suite, on peut déterminer l'altitude géodésique  $he$  :

$$\boxed{he = \frac{r}{\cos\varphi} - N(\varphi)} \quad (5.28)$$

## 5.5 Calcul des Lignes Géodésiques de L'Ellipsoïde de Révolution

" A côté de la difficulté principale, de celle qui tient au fond même des choses, il y a une foule de difficultés secondaires qui viennent compliquer encore la tâche du chercheur. Il y aurait donc intérêt à étudier d'abord un problème où l'on rencontrerait cette difficulté principale, mais où l'on serait affranchis de toutes les difficultés secondaires. Ce problème est tout trouvé, c'est celui des **lignes géodésiques** d'une surface ; c'est encore un problème de dynamique, de sorte que la difficulté principale subsiste ; mais c'est le plus simple de tous les problèmes de dynamique. "

(H. Poincaré<sup>1</sup>, 1905)

1. **Henri Poincaré** (1854-1912) : mathématicien français, parmi les plus grands du XIXème siècle.

Après avoir défini les lignes géodésiques d'une surface, on établit les équations des géodésiques pour une surface donnée. Comme application, on détaille celles de l'ellipsoïde de révolution. On fera l'intégration de ces équations.

### 5.5.1. Introduction et Notations

Soit  $(S)$  une surface définie par les paramètres  $(u, v)$  avec  $(u, v) \in \mathcal{D}$  un domaine  $\subset \mathbb{R}^2$ . Un point  $M \in (S)$  vérifie :

$$\mathbf{OM} = \mathbf{OM}(u, v) \begin{cases} x(u, v) \\ y(u, v) \\ z(u, v) \end{cases} \quad (5.29)$$

On introduit les notations usuelles :

$$\begin{aligned} E &= \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} = \left\| \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} \right\|^2 \\ F &= \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v} \\ G &= \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v} = \left\| \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v} \right\|^2 \end{aligned} \quad (5.30)$$

Des équations (5.30), on obtient les équations :

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial u} &= 2 \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial u^2} \\ \frac{\partial E}{\partial v} &= 2 \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial u \partial v} \\ \frac{\partial F}{\partial u} &= \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial u^2} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v} + \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial u \partial v} \\ \frac{\partial F}{\partial v} &= \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial v^2} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} + \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial u \partial v} \\ \frac{\partial G}{\partial u} &= 2 \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial u \partial v} \\ \frac{\partial G}{\partial v} &= 2 \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial v^2} \end{aligned} \quad (5.31)$$

Soit  $\mathbf{n}$  le vecteur unitaire normal en  $M(u, v)$  à la surface  $(S)$ ,  $\mathbf{n}$  est donné par :

$$\mathbf{n} = \frac{\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} \wedge \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v}}{H} \quad (5.32)$$

avec :

$$H = \left\| \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} \wedge \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v} \right\| \quad (5.33)$$

D'où :

$$ds^2 = E.du^2 + 2.F.du.dv + G.dv^2 \quad (5.34)$$

L'équation (5.34) représente le carré infinitésimal de la longueur de l'arc.

Soit une courbe  $(\Gamma)$  tracée sur  $(S)$  et  $\mathbf{N}$  est le vecteur unitaire de la normale principale le long de  $(\Gamma)$ .

**Définition 5.4** Une courbe  $(\Gamma)$  est dite ligne géodésique de la surface  $(S)$  si et seulement si les vecteurs  $\mathbf{n}$  et  $\mathbf{N}$  sont colinéaires.

On démontre par le calcul des variations (*P. Petersen, 1998*) que la ligne géodésique entre deux points d'une surface  $(S)$  lorsqu'elle existe est la courbe de longueur minimale joignant les deux points.

### 5.5.2. Les Equations Différentielles des Lignes Géodésiques

On calcule l'expression de  $\mathbf{N}$ , on obtient :

$$\mathbf{N} = R \frac{d\mathbf{T}}{ds}$$

or :

$$\mathbf{T} = \frac{d\mathbf{M}}{ds} = \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} \frac{du}{ds} + \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v} \frac{dv}{ds}$$

d'où :

$$\frac{d\mathbf{T}}{ds} = \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial u^2} \left( \frac{du}{ds} \right)^2 + 2 \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial u \partial v} \frac{du}{ds} \frac{dv}{ds} + \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} \frac{d^2 u}{ds^2} + \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v} \frac{d^2 v}{ds^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial v^2} \left( \frac{dv}{ds} \right)^2$$

La condition  $\mathbf{n} // \mathbf{N}$  peut être écrite :

$$\mathbf{N} \wedge \mathbf{n} = 0$$

soit :

$$R \frac{d\mathbf{T}}{ds} \wedge \left( \frac{\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} \wedge \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v}}{H} \right) = 0 \quad (5.35)$$

Utilisant la formule du produit vectoriel :

$$\mathbf{A} \wedge (\mathbf{B} \wedge \mathbf{C}) = (\mathbf{A} \cdot \mathbf{C})\mathbf{B} - (\mathbf{A} \cdot \mathbf{B})\mathbf{C} \quad (5.36)$$

on obtient :

$$\left( \frac{d\mathbf{T}}{ds} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v} \right) \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} - \left( \frac{d\mathbf{T}}{ds} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} \right) \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v} = 0$$

Or  $\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u}$  et  $\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v}$  forment une base du plan tangent en M, d'où les deux conditions :

$$\frac{d\mathbf{T}}{ds} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{d\mathbf{T}}{ds} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} = 0 \quad (5.37)$$

Ce qui donne deux équations différentielles du second ordre :

$$\frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial u^2} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v} \left( \frac{du}{ds} \right)^2 + F \frac{d^2 u}{ds^2} + 2 \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial u \partial v} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v} \frac{du}{ds} \frac{dv}{ds} + \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial v^2} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial v} \left( \frac{dv}{ds} \right)^2 + G \frac{d^2 v}{ds^2} = 0 \quad (5.38)$$

et :

$$\frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial v^2} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} \left( \frac{dv}{ds} \right)^2 + F \frac{d^2 v}{ds^2} + 2 \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial u \partial v} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} \frac{du}{ds} \frac{dv}{ds} + \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial u^2} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial u} \left( \frac{du}{ds} \right)^2 + E \frac{d^2 u}{ds^2} = 0 \quad (5.39)$$

On pose :

$$\begin{aligned} E'_u &= \frac{\partial E}{\partial u}; & E'_v &= \frac{\partial E}{\partial v}; & F'_u &= \frac{\partial F}{\partial u} \\ F'_v &= \frac{\partial F}{\partial v}; & G'_u &= \frac{\partial G}{\partial u}; & G'_v &= \frac{\partial G}{\partial v} \end{aligned} \quad (5.40)$$

et on utilise les équations (5.31), (5.38) et 5.39), ces 2 dernières équations peuvent être écrites :

$$\boxed{\left( F'_u - \frac{E'_v}{2} \right) \left( \frac{du}{ds} \right)^2 + F \frac{d^2 u}{ds^2} + G'_u \frac{du}{ds} \frac{dv}{ds} + \frac{G'_v}{2} \left( \frac{dv}{ds} \right)^2 + G \frac{d^2 v}{ds^2} = 0} \quad (5.41)$$

$$\boxed{\left( F'_v - \frac{G'_u}{2} \right) \left( \frac{dv}{ds} \right)^2 + F \frac{d^2 v}{ds^2} + E'_v \frac{dv}{ds} \frac{du}{ds} + \frac{E'_u}{2} \left( \frac{du}{ds} \right)^2 + E \frac{d^2 u}{ds^2} = 0} \quad (5.42)$$

### 5.5.3. Détermination des Lignes Géodésiques de l'ellipsoïde de révolution

On considère maintenant comme surface l'ellipsoïde de révolution qu'on paramètre comme suit :

$$\begin{aligned} X &= N \cos \varphi \cos \lambda \\ Y &= N \cos \varphi \sin \lambda \\ Z &= N(1 - e^2) \sin \varphi \end{aligned} \quad (5.43)$$

où :

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} = aW^{-1/2}$$

est le rayon de courbure de la grande normale avec :

$$W = 1 - e^2 \sin^2 \varphi$$

On note :

$$r = N \cos \varphi$$

le rayon du parallèle de latitude  $\varphi$  et  $\rho$  le rayon de courbure de la méridienne donné par :

$$\rho = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi) \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} = a(1 - e^2)W^{-3/2}$$

Alors la première forme fondamentale s'écrit :

$$ds^2 = \rho^2 d\varphi^2 + r^2 d\lambda^2 \quad (5.44)$$

En prenant comme variables  $u = \varphi$  et  $v = \lambda$ , on obtient :

$$E = E(\varphi) = \rho^2, \quad F = 0, \quad G = r^2 \quad (5.45)$$

$$E'_\varphi = 2\rho\rho', \quad E'_\lambda = 0, \quad F'_\varphi = F'_\lambda = 0, \quad G'_\varphi = 2rr', \quad G'_\lambda = -2r\rho \sin \varphi, \quad G'_\lambda = 0 \quad (5.46)$$

Alors les équations (5.41) et (5.42) deviennent :

$$-2r\rho \sin \varphi \frac{d\varphi}{ds} \frac{d\lambda}{ds} + r^2 \frac{d^2 \lambda}{ds^2} = 0 \quad (5.47)$$

$$r\rho \sin \varphi \left( \frac{d\lambda}{ds} \right)^2 + \rho\rho' \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 + \rho^2 \frac{d^2 \varphi}{ds^2} = 0 \quad (5.48)$$

La première équation s'écrit :

$$\frac{d}{ds} \left( r^2 \frac{d\lambda}{ds} \right) = 0 \quad (5.49)$$

dont l'intégration donne :

$$r^2 \frac{d\lambda}{ds} = C = \text{constante} \quad (5.50)$$

On retrouve alors la relation de Clairaut (*J. Lemenestrel*, 1980) :<sup>2</sup>

$$\boxed{r \cdot \sin Az = \text{constante} = C = a \sin Aze} \quad (5.51)$$

où  $Az$  est l'azimut de la géodésique au point  $M$  et  $Aze$  son azimut initial au point  $M_0$  à l'équateur.

L'équation (5.48) s'écrit :

$$\rho \left( r \sin \varphi \left( \frac{d\lambda}{ds} \right)^2 + \rho' \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 + \rho \frac{d^2\varphi}{ds^2} \right) = 0 \quad (5.52)$$

Ce qui donne :

-  $\rho = 0$  le point  $M$  est sur l'équateur :  $\varphi = 0$  et  $r = a$  le demi-grand axe de l'ellipsoïde et l'équation (5.47) devient :

$$\frac{d^2\lambda}{ds^2} = 0 \quad (5.53)$$

dont l'intégration donne :

$$\lambda - \lambda_0 = l(s - s_0) \quad (5.54)$$

le point  $M$  décrit l'équateur et la géodésique est le grand cercle de rayon  $a$ .

-  $\rho \neq 0$ , le point  $M$  n'est pas sur l'équateur, l'équation (5.48) s'écrit comme suit :

$$\rho \frac{d^2\varphi}{ds^2} + \rho' \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 + r \sin \varphi \left( \frac{d\lambda}{ds} \right)^2 = 0 \quad (5.55)$$

Pour intégrer (5.55), on utilise une nouvelle fonction, soit :

$$Z = \frac{d\lambda}{d\varphi} \quad (5.56)$$

De (5.50), on obtient :

$$\frac{d\varphi}{ds} = \frac{d\varphi}{d\lambda} \frac{d\lambda}{ds} = \frac{C}{r^2} \frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{C}{r^2 Z}$$

---

2. **Alexis Claude de Clairaut** (1713-1765) : mathématicien, astronome et géophysicien français.

soit :

$$\frac{d\varphi}{ds} = \frac{C}{r^2 Z} \quad (5.57)$$

On exprime maintenant la dérivée seconde  $d^2\varphi/ds^2$  :

$$\frac{d^2\varphi}{ds^2} = \frac{d}{ds} \left( \frac{d\varphi}{ds} \right) = \frac{d}{d\varphi} \left( \frac{d\varphi}{ds} \right) \frac{d\varphi}{ds} = \frac{1}{2} \frac{d}{d\varphi} \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 \quad (5.58)$$

L'équation (5.55) s'écrit en utilisant (5.50) et (5.58) :

$$\frac{\rho}{2} \frac{d}{d\varphi} \left[ \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 \right] + \rho' \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 + \sin\varphi \left( \frac{C^2}{r^3} \right) = 0 \quad (5.59)$$

On pose :

$$U = \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 \quad (5.60)$$

L'équation (5.59) devient :

$$\frac{\rho}{2} \frac{dU}{d\varphi} + \rho' U = -\frac{C^2 \sin\varphi}{r^3} \quad (5.61)$$

L'équation (5.61) est une équation différentielle linéaire du premier ordre avec second membre. Sa résolution sans second membre donne :

$$U = \frac{k}{\rho^2} \quad (5.62)$$

En utilisant le second membre de (5.61), on considère que  $k$  est une fonction de  $\varphi$ , on a alors :

$$U = \frac{1}{\rho^2} \left( k_0 - \frac{C^2}{r^2} \right) = \frac{k_0 r^2 - C^2}{\rho^2 r^2} \quad (5.63)$$

avec  $k_0$  la constante d'intégration.  $U$  étant une fonction positive, on doit avoir :

$$k_0 r^2 - C^2 > 0 \quad (5.64)$$

En revenant à l'équation (5.60), on obtient :

$$U = \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 = \frac{k_0 r^2 - C^2}{\rho^2 r^2} \quad (5.65)$$

On utilise les équations (5.57) et (5.65), on obtient :

$$\left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 = \frac{k_0 r^2 - C^2}{\rho^2 r^2} = \left( \frac{C}{r^2 Z} \right)^2 = \frac{C^2}{r^4 Z^2} = \frac{C^2}{r^4} \left( \frac{d\varphi}{d\lambda} \right)^2 \quad (5.66)$$

ce qui donne :

$$\left(\frac{d\lambda}{d\varphi}\right)^2 = \frac{\rho^2}{r^2} \frac{C^2}{k_0 r^2 - C^2} \quad (5.67)$$

Pour déterminer la valeur de  $k_0$ , on exprime  $\frac{d\lambda}{ds}$  en utilisant les équations (5.50) et (5.67). On écrit  $ds^2$  :

$$ds^2 = \rho^2 d\varphi^2 + r^2 d\lambda^2 = \frac{r^2(k_0 r^2 - C^2)}{C^2} d\lambda^2 + r^2 d\lambda^2$$

soit :

$$ds^2 = \frac{r^4 k_0}{C^2} d\lambda^2 \Rightarrow \left(\frac{d\lambda}{ds}\right)^2 = \frac{C^2}{k_0 r^4} \quad (5.68)$$

Or d'après (5.50) :

$$\left(\frac{d\lambda}{ds}\right)^2 = \frac{C^2}{r^4}$$

d'où alors  $k_0 = 1$  et par suite :

$$\left(\frac{d\lambda}{d\varphi}\right)^2 = \frac{\rho^2}{r^2} \frac{C^2}{r^2 - C^2} \quad (5.69)$$

Pour pouvoir intégrer l'équation précédente, on exprime  $r^2 - C^2$ , d'où :

$$\begin{aligned} r^2 - C^2 &= N^2 \cos^2 \varphi - C^2 = \frac{a^2 \cos^2 \varphi}{1 - e^2 \sin^2 \varphi} - C^2 = \\ &= \frac{(a^2 - C^2) \left(1 - \frac{a^2 - C^2 e^2}{a^2 - C^2} \sin^2 \varphi\right)}{W} \end{aligned} \quad (5.70)$$

On pose :

$$k^2 = \frac{a^2 - C^2 e^2}{a^2 - C^2} \quad (5.71)$$

D'où :

$$r^2 - C^2 = (a^2 - C^2)(1 - k^2 \sin^2 \varphi) / W \quad (5.72)$$

On remarque que le coefficient  $k$  est supérieur à 1, donc la latitude géodésique  $\varphi$  reste inférieure à la latitude  $\varphi_1$  définie par  $\sin \varphi_1 = 1/k$ .

Alors l'équation (5.69) s'écrit :

$$\left(\frac{d\lambda}{d\varphi}\right)^2 = \frac{(1 - e^2)^2 C^2}{(a^2 - C^2) \cos^2 \varphi (1 - e^2 \sin^2 \varphi) (1 - k^2 \sin^2 \varphi)} \quad (5.73)$$

D'où en remplaçant  $C$  par  $a \sin(Aze)$  et comme  $tg(Aze)$  est de même signe que  $(d\lambda/d\varphi)$ , on peut écrire alors :

$$\frac{d\lambda}{d\varphi} = \frac{(1-e^2)tg(Aze)}{\cos\varphi\sqrt{(1-e^2\sin^2\varphi)(1-k^2\sin^2\varphi)}} \quad (5.74)$$

Soit en intégrant entre 0 et  $\varphi$  :

$$\begin{aligned} \lambda - \lambda_e &= \int_0^\varphi \frac{(1-e^2)tg(Aze)}{\cos t\sqrt{(1-e^2\sin^2 t)(1-k^2\sin^2 t)}} dt = \\ &(1-e^2)tg(Aze) \int_0^\varphi \frac{dt}{\cos t\sqrt{(1-e^2\sin^2 t)(1-k^2\sin^2 t)}} \end{aligned}$$

ou encore :

$$\lambda - \lambda_e = (1-e^2)tg(Aze) \int_0^\varphi \frac{dt}{\cos t\sqrt{(1-e^2\sin^2 t)(1-k^2\sin^2 t)}} \quad (5.75)$$

En prenant comme variable  $w = \sin t$ , l'intégrale (5.75) devient :

$$\boxed{\lambda - \lambda_e = (1-e^2)tg(Aze) \int_0^{\sin\varphi} \frac{dw}{(1-w^2)\sqrt{(1-e^2w^2)(1-k^2w^2)}}} \quad (5.76)$$

On cherche maintenant à exprimer l'abscisse curviligne  $s$  en fonction de  $\varphi$ . Or l'expression de  $ds^2$  est égale à :

$$ds^2 = \rho^2 d\varphi^2 + r^2 d\lambda^2 = \rho^2 d\varphi^2 + \frac{C^2}{r^2} ds^2$$

soit :

$$ds^2 = \frac{r^2 \rho^2 d\varphi^2}{r^2 - C^2} = \frac{a^2(1-e^2)^2 \cos^2 \varphi d\varphi^2}{\cos^2(Aze)(1-e^2\sin^2\varphi)^3(1-k^2\sin^2\varphi)} \quad (5.77)$$

D'où :

$$ds = \frac{a(1-e^2)\cos\varphi d\varphi}{\cos(Aze)(1-e^2\sin^2\varphi)\sqrt{(1-k^2\sin^2\varphi)(1-e^2\sin^2\varphi)}} \quad (5.78)$$

En prenant  $t = \sin\varphi$  comme nouvelle variable, l'intégrale de (5.78) donne en prenant comme origine de l'abscisse curviligne  $s$  un point de l'équateur :

$$\boxed{s = \frac{a(1-e^2)}{\cos Aze} \int_0^{\sin\varphi} \frac{dt}{(1-e^2t^2)\sqrt{(1-k^2t^2)(1-e^2t^2)}}} \quad (5.79)$$

Les intégrales (5.76) et (5.79) sont dites des intégrales elliptiques de troisième espèce.

## 5.6 Applications aux Problèmes Direct et Inverse du Calcul des Lignes Géodésiques

Dans cette deuxième partie, on va traiter numériquement l'application des formules précédentes dans la résolution des problèmes dits respectivement direct et inverse du calcul des lignes géodésiques.

### 5.6.1. Le Problème Direct

On donne :

- $(\varphi_1, \lambda_1)$  d'un point  $M_1$  ;
- la longueur  $s$  de la géodésique de  $M_1$  à  $M_2$  ;
- l'azimut géodésique  $Az_1$  de la ligne géodésique de  $M_1$  à  $M_2$ .

On demande de calculer :

- les coordonnées géodésiques  $(\varphi_2, \lambda_2)$  de  $M_2$  ;
- l'azimut géodésique  $Az_2$  en  $M_2$ .

**Solution :** 1. Calcul de la constante  $C$ ,  $C = N(\varphi_1) \cdot \cos \varphi_1 \cdot \sin Az_1 = a \cdot \sin(Aze)$  d'où  $Aze$  et  $k$ .

2. Détermination de  $\varphi_2$  à partir de :

$$\Delta s = \frac{a(1-e^2)}{\cos Aze} \frac{\cos \varphi_1 \Delta \varphi}{(1-e^2 \sin^2 \varphi_1) \sqrt{(1-k^2 \sin^2 \varphi_1)(1-e^2 \sin^2 \varphi_1)}}$$

avec  $\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ .

3. Ayant  $\varphi_2$ , on calcule  $\lambda_2$  par :

$$\lambda_2 - \lambda_1 = (1-e^2) \operatorname{tg}(Aze) \int_{\sin \varphi_1}^{\sin \varphi_2} \frac{dw}{(1-w^2) \sqrt{(1-e^2 w^2)(1-k^2 w^2)}}$$

4. Le calcul de  $Az_2$  se fait par  $\sin(Az_2) = C/r(\varphi_2)$ .

### 5.6.2. Le Problème Inverse

On donne les coordonnées  $(\varphi_1, \lambda_1)$  et  $(\varphi_2, \lambda_2)$  de deux points  $M_1$  et  $M_2$ . On demande de calculer :

- la longueur  $s$  de la ligne géodésique de  $M_1$  à  $M_2$  ;
- l'azimut  $Az_1$  en  $M_1$  ;
- l'azimut géodésique  $Az_2$  en  $M_2$ .

**Solution :**

1. On doit calculer la constante  $C$ . A partir de l'équation (5.69), on peut écrire que :

$$\left(\frac{\Delta\lambda}{\Delta\varphi}\right)^2 = \frac{\rho^2(\varphi_1)}{r^2(\varphi_1)} \frac{C^2}{(r^2(\varphi_1) - C^2)} = \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)^2}{(\varphi_2 - \varphi_1)^2}$$

ce qui donne  $C$  :

$$C = \frac{\frac{r^2 \Delta\lambda}{\rho \Delta\varphi}}{\sqrt{1 + \frac{r^2}{\rho^2} \left(\frac{\Delta\lambda}{\Delta\varphi}\right)^2}}$$

En considérant l'azimut compris entre 0 et  $\pi$ , donc  $Az$  est positif,  $C$  est positif. En le calculant pour  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$ , on obtient  $C$  par la valeur moyenne :

$$C = \frac{C_1(\varphi_1) + C_2(\varphi_2)}{2}$$

2. Par suite, on obtient la valeur de  $k$  par (5.71) :

$$k = \frac{a^2 - C^2 e^2}{a^2 - C^2}$$

3. Ayant  $C$ , on a par (5.51),  $Az_1$  et  $Az_2$  :

$$\sin Az_1 = \frac{C}{r(\varphi_1)} \quad \text{et} \quad \sin Az_2 = \frac{C}{r(\varphi_2)}$$

4. Par suite, on a aussi  $Az_e$  :

$$\sin Az_e = \frac{C}{a}$$

5. Enfin, l'équation (5.79) détermine  $s$ .

On itère le processus.

### 5.6.3. Calcul de l'Expression (5.79)

Dans ce paragraphe, on calcule en détail :

$$s = \frac{a(1-e^2)}{\cos A z_e} \int_0^{\sin \varphi} \frac{dt}{(1-e^2 t^2) \sqrt{(1-k^2 t^2)(1-e^2 t^2)}}$$

Pour  $|x| < 1$ , on a les développements limités suivants :

$$\frac{1}{(1+x)^{3/2}} = 1 - \frac{3}{2}x + \frac{15}{8}x^2 - \frac{35}{16}x^3 + \frac{315}{128}x^4 + \dots \quad (5.80)$$

$$\frac{1}{\sqrt{1-x}} = 1 + \frac{x}{2} + \frac{3x^2}{8} + \frac{5x^3}{16} + \frac{35x^4}{128} + \dots \quad (5.81)$$

En prenant  $x = -e^2 t^2$  et  $x = k^2 t^2$ , on obtient :

$$\begin{aligned} \frac{1}{(1-e^2 t^2)^{3/2}} &= 1 + \frac{3}{2}e^2 t^2 + \frac{15}{8}e^4 t^4 + \frac{35}{16}e^6 t^6 + \frac{315}{128}e^8 t^8 + \dots \\ \frac{1}{\sqrt{1-k^2 t^2}} &= 1 + \frac{k^2 t^2}{2} + \frac{3k^4 t^4}{8} + \frac{5k^6 t^6}{16} + \frac{35k^8 t^8}{128} + \dots \end{aligned} \quad (5.82)$$

Par suite :

$$\begin{aligned} \frac{1}{(1-e^2 t^2) \sqrt{(1-k^2 t^2)(1-e^2 t^2)}} &= 1 + \frac{k^2 + 3e^2}{2} t^2 + \frac{3k^4 + 6e^2 k^2 + 15e^4}{8} t^4 + \\ &\quad \frac{5k^6 + 9k^4 e^2 + 15k^2 e^4 + 35e^6}{16} t^6 + \\ &\quad \frac{35k^8 + 60k^6 e^2 + 90k^4 e^4 + 140k^2 e^6 + 315e^8}{128} t^8 + \dots \end{aligned} \quad (5.83)$$

ou encore à l'ordre 4 :

$$\frac{1}{(1-e^2 t^2) \sqrt{(1-k^2 t^2)(1-e^2 t^2)}} = 1 + m t^2 + n t^4 + \dots \quad (5.84)$$

avec :

$$m = \frac{k^2 + 3e^2}{2}; \quad n = \frac{3k^4 + 6e^2 k^2 + 15e^4}{8}$$

### 5.6.4. Calcul de l'expression (5.76)

On a :

$$\lambda - \lambda_e = (1 - e^2) \operatorname{tg}(Aze) \int_0^{\sin \varphi} \frac{dw}{(1 - w^2) \sqrt{(1 - e^2 w^2)(1 - k^2 w^2)}}$$

soit dans notre cas :

$$\lambda_2 - \lambda_1 = (1 - e^2) \operatorname{tg}(Aze) \int_{\sin \varphi_1}^{\sin \varphi_2} \frac{dt}{(1 - t^2) \sqrt{(1 - e^2 t^2)(1 - k^2 t^2)}}$$

Or d'après (5.81) :

$$\frac{1}{\sqrt{1 - e^2 t^2}} = 1 + \frac{1}{2} e^2 t^2 + \frac{3}{8} e^4 t^4 + \frac{5}{16} e^6 t^6 + \frac{35}{128} e^8 t^8 + \dots$$

et :

$$\frac{1}{\sqrt{1 - k^2 t^2}} = 1 + \frac{k^2 t^2}{2} + \frac{3k^4 t^4}{8} + \frac{5k^6 t^6}{16} + \frac{35k^8 t^8}{128} + \dots$$

et pour  $(1 - t^2)^{-1}$ , on obtient :

$$\frac{1}{1 - t^2} = 1 + t^2 + t^4 + t^6 + t^8 + \dots$$

D'où :

$$\begin{aligned} \frac{1}{(1 - t^2) \sqrt{(1 - e^2 t^2)(1 - k^2 t^2)}} &= 1 + \frac{2 + k^2 + e^2}{2} t^2 + \\ &\frac{8 + 4k^2 + 4e^2 + 3k^4 + 2e^2 k^2 + 3e^4}{8} t^4 + \\ &\frac{16 + 8k^2 + 8e^2 + 6k^4 + 4e^2 k^2 + 6e^4 + 5k^6 + 3k^4 e^2 + 3k^2 e^4 + 5e^6}{16} t^6 + \dots \end{aligned}$$

Qu'on écrit sous la forme :

$$\frac{1}{(1 - t^2) \sqrt{(1 - e^2 t^2)(1 - k^2 t^2)}} = 1 + \alpha t^2 + \beta t^4 + \gamma t^6 + \dots \quad (5.85)$$

avec :

$$\begin{cases} \alpha = \frac{2 + k^2 + e^2}{2} \\ \beta = \frac{8 + 4k^2 + 4e^2 + 3k^4 + 2e^2k^2 + 3e^4}{8} \\ \gamma = \frac{16 + 8k^2 + 8e^2 + 6k^4 + 4e^2k^2 + 6e^4 + 5k^6 + 3k^4e^2 + 3k^2e^4 + 5e^6}{16} \end{cases} \quad (5.86)$$

### 5.6.5. Traitement d'un exemple

#### Le Problème direct

Soit le point  $M_1$  avec :

- $\varphi_1 = 10.45498299 \text{ gr}$  ;
- $\lambda_1 = 9.59542429 \text{ gr}$  ;
- $Az_1 = 249.310168 \text{ gr}$  ;
- $s = 16255.206 \text{ m}$ .

#### Solution :

$$- C = N(\varphi_1) \cdot \cos \varphi_1 \cdot \sin Az_1 = -3 \cdot 594478.080 \text{ m} ;$$

$$- Az_e = 238.1131471 \text{ gr} ;$$

$$- k = \sqrt{\frac{a^2 - C^2 e^2}{a^2 - C^2}} = 1.209227584 ;$$

- pour calculer  $\varphi_2$ , on pose  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ , et  $s = \Delta s$ , on a alors l'équation en utilisant (5.84) :

$$\frac{\Delta s \cdot \cos Az_e}{a(1 - e^2)} = \int_{\sin \varphi_1}^{\sin \varphi_2} \frac{dt}{(1 - e^2 t^2) \sqrt{(1 - k^2 t^2)(1 - e^2 t^2)}} = \int_{\sin \varphi_1}^{\sin \varphi_2} (1 + mt + nt^2) dt$$

$$\text{A l'ordre 1, on a : } \frac{\Delta s \cdot \cos Az_e}{a(1 - e^2)} = \sin \varphi_2 - \sin \varphi_1.$$

## 5.7 Exercices et Problèmes

**Exercice 5.1** A partir de la définition géométrique de l'ellipse (5.1) donnée par :

$$MF + MF' = \text{constante} = 2a$$

retrouver l'expression de l'équation cartésienne de l'ellipse.

**Exercice 5.2** Montrer la formule très utilisée en géodésie :

$$\frac{d(N \cos \varphi)}{d\varphi} = -\rho \sin \varphi$$

avec  $N$  et  $\rho$  les deux rayons de courbures principaux de l'ellipsoïde de révolution donnés respectivement par (5.17) et (5.20).

**Problème 5.1** A partir des équations de l'ellipsoïde de révolution :

$$M = \begin{cases} X = N \cos \varphi \cos \lambda \\ Y = N \cos \varphi \sin \lambda \\ Z = N(1 - e^2) \sin \varphi \end{cases}$$

1. Calculer les vecteurs :

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \lambda}, \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \varphi}$$

2. Calculer les coefficients :

$$E = \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \lambda} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \lambda}, \quad F = \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \lambda} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \varphi}, \quad G = \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \varphi}$$

Démontrer que l'expression de la première forme fondamentale s'écrit :

$$ds^2 = \rho^2 d\varphi^2 + N^2 \cos^2 \varphi d\lambda^2$$

3. Calculer le vecteur normal  $\mathbf{n}$  :

$$\mathbf{n} = \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \lambda} \wedge \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \varphi} \frac{1}{\left\| \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \lambda} \wedge \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \varphi} \right\|}$$

4. Calculer les vecteurs :

$$\frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial \lambda^2}, \quad \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial \lambda \partial \varphi}, \quad \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial \varphi^2}$$

5. Déterminer les coefficients :

$$L = n \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial \lambda^2}, \quad M = n \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial \lambda \partial \varphi}, \quad N = n \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial^2 \varphi}$$

6. Ecrire la deuxième forme fondamentale  $\Phi(\lambda, \varphi)$ .

7. En appliquant la formule (4.40), Montrer que :

$$N(\varphi) = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$$

est le rayon de courbure de la section normale au point  $M$  perpendiculaire au plan de la méridienne de l'ellipsoïde de révolution.

8. En posant :

$$d\mathcal{L} = \frac{\rho d\varphi}{N \cos \varphi}$$

En déduire que  $ds^2$  s'écrit :

$$ds^2 = N^2 \cos^2 \varphi (d\mathcal{L}^2 + d\lambda^2)$$

9. Montrer que  $\mathcal{L}$  est donnée par :

$$\mathcal{L}(\varphi) = \text{Logtg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - \frac{e}{2} \text{Log} \left( \frac{1 + e \sin \varphi}{1 - e \sin \varphi} \right)$$

**Problème 5.2** Sur l'ellipsoïde, on note  $\varphi$  la latitude géodésique et  $\psi$  la latitude réduite.

1. Calculer  $\rho$  le rayon de courbure de l'ellipse méridienne en fonction de  $\psi$ .
2. Exprimer l'aplatissement de l'ellipsoïde en fonction des valeurs de  $\rho$  au pôle et à l'équateur.
3. On mesure la longueur d'un arc de méridien d'un degré à la fois au pôle et à l'équateur. On trouve respectivement 111695m et 110573m. En déduire l'aplatissement.

**Problème 5.3** On donne les coordonnées tridimensionnelles suivantes d'un point  $M$  :

$$M = (X, Y, Z) = (4300244.860m, 1062094.681m, 4574775.629m)$$

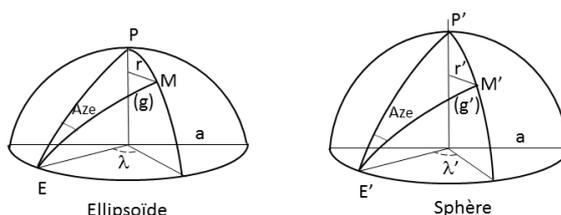
Les paramètres de l'ellipsoïde de référence sont  $a = 6378137.00m$ ,  $e^2 = 0.00669438$ .

1. Calculer le demi-petit axe  $b$ .

2. Calculer l'aplatissement.

3. Calculer les coordonnées géodésiques  $(\varphi, \lambda, h_e)$  du point  $M$ .  $\varphi$  et  $\lambda$  seront calculées en grades avec cinq chiffres après la virgule.

**Problème 5.4** Soit  $\mathcal{E}(a, e)$  un ellipsoïde de révolution où  $a, e$  sont respectivement le demi-grand axe et la première excentricité.  $(g)$  une géodésique partant d'un point  $E(\varphi = 0, \lambda_E)$  sur l'équateur et d'azimut  $Az_E$ . A cette géodésique, on lui fait correspondre une géodésique  $(g')$  sur la sphère  $\mathcal{S}^2$  dite de Jacobi<sup>3</sup> de rayon  $a$ , ayant le même azimut  $Az_E$  au point  $E'(\varphi' = 0, \lambda_E)$ . De même au point  $M(\varphi, \lambda)$  de la géodésique  $(g)$  de l'ellipsoïde, on lui fait correspondre le point  $M'(\varphi', \lambda')$  de  $(g')$  de  $\mathcal{S}^2$  tel qu'il y a conservation des azimuts.



**Fig. 5.7** La correspondance de la sphère de Jacobi

1. Ecrire l'équation de Clairaut pour la géodésique  $(g)$ .

2. On note  $r'$  le rayon du parallèle passant par  $M'$  de la géodésique  $(g')$ . Ecrire de même l'équation de Clairaut pour la géodésique  $(g')$ .

3. Montrer que  $\varphi$  et  $\varphi'$  vérifient :

$$N \cos \varphi = a \cos \varphi'$$

et en déduire que  $\varphi'$  est la latitude paramétrique de  $M$ .

4. Ecrire les expressions de  $\operatorname{tg} Az_g$  et  $\operatorname{tg} Az_{g'}$  respectivement sur  $(g)$  et  $(g')$ .

5. Montrer que :

$$d\lambda = \frac{\rho d\varphi}{a d\varphi'} d\lambda'$$

En déduire que :

$$d\lambda = \sqrt{1 - e^2 \cos^2 \varphi'} d\lambda'$$

3. Carl Gustav Jacob Jacobi (1804-1851) : mathématicien allemand.

6. En intégrant l'équation précédente, montrer qu'on obtient :

$$\lambda - \lambda_E = \int_{\lambda_E}^{\lambda' + \lambda_E} \sqrt{1 - e^2 \cos^2 \varphi'} d\lambda'$$

avec  $\lambda > \lambda_E$  et  $\lambda'$  est comptée à partir de  $\lambda_E$ .

7. En écrivant  $\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \varphi'} = 1 - \frac{e^2}{2} \cos^2 \varphi' + o(e^4)$  où  $o(e^4)$  est un infiniment petit d'ordre 4 en  $e$  dont on néglige, écrire l'intégrale précédente entre  $\lambda_E$  et  $\lambda_E + \lambda$ .

8. Comme  $(g')$  est une géodésique de la sphère, on démontre que :

$$\cos^2 \varphi' d\lambda' = \frac{\sin Az_E}{a} ds'$$

où  $ds'$  est l'élément différentiel de l'abscisse curviligne sur la géodésique (un grand cercle). Alors en posant  $s' = 0$  au point  $E'$ , montrer que l'équation précédente s'écrit sous la forme :

$$\lambda = \lambda_E + \lambda' - \frac{e^2 \sin Az_E}{2a} \int_0^{s'} ds'$$

9. On suppose que la géodésique  $(g')$  coupe une première fois le plan de l'équateur en un point  $F'$ , montrer qu'on obtient :

$$\begin{aligned} \lambda'_F &= \pi \\ s' &= \pi a \\ \lambda_F &= \lambda_E + \pi - \frac{e^2 \pi \sin Az_E}{2} \end{aligned}$$

10. La géodésique  $(g')$  partant de  $F'$  a pour azimuth  $\pi - Az_E$ , elle coupe une deuxième fois l'équateur au point  $E'$ , mais la géodésique  $(g)$  sur l'ellipsoïde coupe une deuxième fois le plan de l'équateur au point correspondant à  $H$  dont la longitude est  $\lambda_H$ . Montrer que  $\lambda_H$  est donnée par :

$$\lambda_H = \lambda_E + 2\pi - \frac{e^2 \pi \sin Az_E}{2} - \frac{e^2 \pi \sin(\pi - Az_E)}{2} = \lambda_E + 2\pi - e^2 \pi \sin Az_E$$

Quelle conclusion a-t-on sur les lignes géodésiques de l'ellipsoïde de révolution.

**Problème 5.5** Un point  $M$  de la surface d'une sphère  $(S)$  de rayon  $R$ , a pour coordonnées  $(X, Y, Z)$  dans un repère orthonormé :

$$M = (X, Y, Z) = (R \cos \varphi \cdot \cos \lambda, R \cos \varphi \cdot \sin \lambda, R \sin \varphi)$$

1. Montrer qu'un vecteur normal unitaire  $n$  à  $(S)$  en  $M$  est :

$$n = (\cos\varphi.\cos\lambda, \cos\varphi.\sin\lambda, \sin\varphi)^T$$

2. Soit  $(C)$  le grand cercle passant par le point  $A(R,0,0)$  et d'azimut  $Az_E$ . Le point  $M$  peut être décrit par son abscisse curviligne  $s$  mesurant l'arc  $AM$ . On note par  $\omega$  représente l'angle au centre de l'arc  $AM$ . Utilisant la trigonométrie sphérique, montrer que :

$$\cos\varphi.\sin\lambda = \sin\omega.\sin Az_E$$

3. En utilisant la formule fondamentale de la trigonométrie sphérique dans le triangle  $APM$ , montrer qu'on a les deux relations :

$$\begin{aligned} \cos\omega &= \cos\varphi.\cos\lambda \\ \sin\varphi &= \sin\omega.\cos Az_E \end{aligned}$$

4. En déduire que les coordonnées de  $M$  s'écrivent en fonction de  $s$  comme suit :

$$M \begin{cases} X = R.\cos(s/R) \\ Y = R.\sin Az_E \sin(s/R) \\ Z = R.\cos Az_E \sin(s/R) \end{cases}$$

5. Calculer les vecteurs  $T$  et  $N$  du repère de Frenêt. En déduire les composantes de  $N$  en fonction de  $\omega$ .

6. Montrer que les vecteurs  $N$  et  $n$  sont parallèles.

7. Justifier que les géodésiques de la sphère sont les grands cercles.

**Problème 5.6** Soit le tore  $\mathbb{T}$  défini par les équations suivantes :

$$M(\varphi, \lambda) = \begin{cases} x = (a + R\cos\varphi)\cos\lambda \\ y = (a + R\cos\varphi)\sin\lambda \\ z = R\sin\varphi \end{cases}$$

où  $a, R$  deux constantes positives avec  $a > R$ ,  $(\varphi, \lambda) \in [0, 2\pi] \times [0, 2\pi]$ .

1. Calculer la première forme fondamentale  $ds^2$ .

2. Avec les notations usuelles, on pose :

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \varphi} &= E'_\varphi, & \frac{\partial E}{\partial \lambda} &= E'_\lambda, & \frac{\partial F}{\partial \varphi} &= F'_\varphi \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda} &= F'_\lambda, & \frac{\partial G}{\partial \varphi} &= G'_\varphi, & \frac{\partial G}{\partial \lambda} &= G'_\lambda \end{aligned}$$

Utilisant les équations des géodésiques (5.41) et (5.42) du cours, montrer que les équations des géodésiques du tore sont :

$$-2R\sin\varphi(a + R\cos\varphi)\frac{d\varphi}{ds}\frac{d\lambda}{ds} + (a + R\cos\varphi)^2\frac{d^2\lambda}{ds^2} = 0$$

$$R\sin\varphi(a + R\cos\varphi)\left(\frac{d\lambda}{ds}\right)^2 + R^2\frac{d^2\varphi}{ds^2} = 0$$

3. Montrer que la première équation ci-dessus donne :

$$(a + R\cos\varphi)^2\frac{d\lambda}{ds} = C = \text{cte}$$

Montrer qu'on retrouve l'équation de Clairaut avec  $C = (a + R)\sin Aze$  où  $Aze$  est l'azimut de départ au point  $M_0(\varphi = 0, \lambda_0)$ .

4. On suppose au point  $M_0$ , la géodésique a pour azimut  $Aze$  tel que :

$$0 < Aze < \frac{\pi}{2}$$

Montrer que la deuxième équation des géodésiques s'écrit en utilisant le résultat précédent :

$$\frac{d^2\varphi}{ds^2} = -\frac{C^2}{R} \frac{\sin\varphi}{(a + R\cos\varphi)^3}$$

5. Montrer qu'on arrive à :

$$\left(\frac{d\varphi}{ds}\right)^2 = l - \frac{C^2}{R^2(a + R\cos\varphi)^2} \geq 0$$

où  $l$  est une constante d'intégration.

# Chapitre 6

## *Les Systèmes Géodésiques*

Parmi les buts de la géodésie, on trouve la définition et la mise en place des systèmes géodésiques.

A un système géodésique, on lui associe le réseau géodésique de base. On verra par la suite, l'établissement et le calcul des réseaux géodésiques.

### 6.1 Définition d'un système géodésique

**Définition 6.1** *Un système géodésique donné est un système de coordonnées où sont représentés les points géodésiques. Il est défini par :*

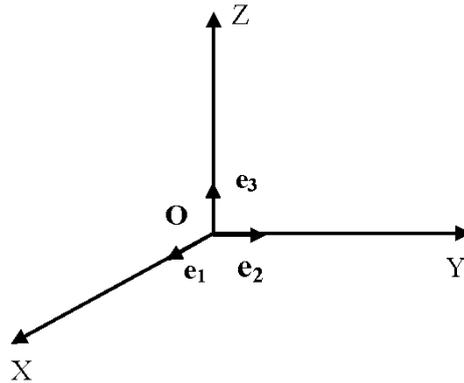
*a - son origine ;*

*b - son orientation ;*

*c - le type de coordonnées choisies pour localiser les points.*

Le système le plus utilisé est le système cartésien formé par un repère  $(OX, OY, OZ)$  tel que l'axe  $OZ$  soit parallèle à l'axe de rotation de la Terre, et le plan  $OXZ$  parallèle au méridien de Greenwich origine des longitudes, l'axe  $OY$  est tel que le trièdre  $(OX, OY, OZ)$  soit orthogonal et direct (**Fig. 6.1**). A ce système, on lui associe une base orthonormée  $(e_1, e_2, e_3)$  c'est-à-dire :

$$\|e_1\| = \|e_2\| = \|e_3\| = 1 \text{ mètre (l'unité des longueurs)}$$



**Fig. 6.1** Le repère cartésien

Pour les systèmes géodésiques classiques (terrestres), la position de l'origine est à 500 m environ du centre des masses de la Terre.

Pour les systèmes géodésiques établis par la géodésie spatiale actuelle (comme le GPS - **G**lobal **P**ositioning **S**ystem), l'origine est presque confondue avec le centre des masses de la Terre (<2 m).

L'orientation du système géodésique classique est faite à partir des observations astronomiques sur les étoiles. Ces observations vont orienter l'axe  $OZ$  et le plan  $OXZ$  du système à être respectivement parallèle à l'axe moyen de la rotation de la Terre et au méridien de Greenwich.

Un système géodésique ou référentiel géodésique ou datum géodésique obéit à certaines conditions à savoir :

- pas de déformation d'échelle ;
- une meilleure distribution des points ;
- la qualité homogène des coordonnées des points.

En général, les référentiels géodésiques nationaux ne remplissent pas toujours ces conditions.

Pour la mise en place d'un système géodésique, on adopte un modèle proche de la Terre. Un premier modèle est une sphère de rayon  $R$  le rayon moyen de la terre. Dans ce cas, les coordonnées tridimensionnelles  $(X, Y, Z)$  d'un point  $M$  s'expriment par :

$$M \begin{cases} X = R \cos \varphi \cdot \cos \lambda \\ Y = R \cos \varphi \cdot \sin \lambda \\ Z = R \sin \varphi \end{cases} \quad (6.1)$$

avec respectivement :

- $\varphi$  la latitude ;
- $\lambda$  la longitude comptée à partir d'un méridien origine, positive vers l'Est ;
- $h$  l'altitude au dessus de la surface.

Le deuxième modèle le plus approprié pour la Terre, après avoir fait de mesures, est l'ellipsoïde de révolution. Ainsi à chaque système géodésique est associé son ellipsoïde de révolution dit l'ellipsoïde de référence.

Un autre problème avec les systèmes géodésiques classiques est qu'il y a deux systèmes indépendants : l'un pour les coordonnées horizontales et un autre pour la composante verticale.

Les réseaux planimétriques ou horizontaux sont déterminés à partir des observations de triangulation (mesures angulaires) en général ou de trilatération (mesures des distances) réduites à l'ellipsoïde adopté.

Par contre, le système altimétrique est observé par le nivellement de précision et la référence des altitudes est déterminée à partir des observations du niveau moyen des mers à l'aide des marégraphes.

À un système donné de coordonnées planes, par exemple les coordonnées Lambert<sup>1</sup>  $(x, y)$ , ou des coordonnées tridimensionnelles  $(X, Y, Z)$  géodésiques (par géodésie classique ou par les techniques spatiales), elles sont associées alors à

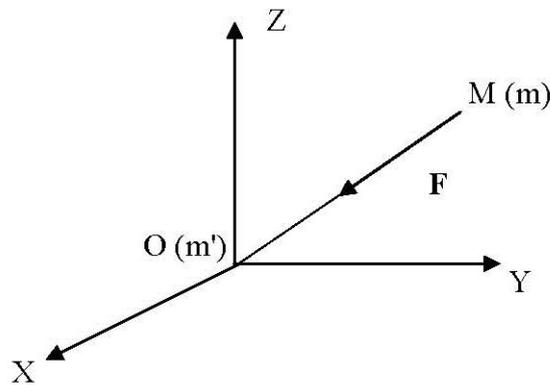
---

1. La représentation conique conforme présentée par **Johann Heinrich Lambert** (1728-1777) : mathématicien, physicien et astronome suisse.

un référentiel ou datum géodésique.

## 6.2 Le géoïde

Soit le repère  $OXYZ$  et une masse ponctuelle  $m'$  au point  $O$  et soit un point  $M(X, Y, Z)$  de masse ponctuelle  $m$  (**Fig. 6.2**).



**Fig. 6.2** Le repère 3D

Alors, le point  $M$  est soumis à une force  $\mathbf{F}$  due à l'attraction de la masse  $m'$  au point  $O$ . Le module de cette force est :

$$F = \frac{Gmm'}{r^2} = F(X, Y, Z) \quad (6.2)$$

où  $G$  est la constante universelle de gravitation et  $r$  est la distance  $OM$ .

### 6.2.1. Le Champ du Potentiel

**Définition 6.2** On appelle champ du potentiel la fonction scalaire  $V$  définie par :

$$V = \frac{Gmm'}{r} = V(X, Y, Z) \quad (6.3)$$

### 6.2.2. Gradient

**Définition 6.3** On appelle gradient d'une fonction scalaire  $U(X, Y, Z)$  le vecteur noté  $\mathbf{grad}U$  et de composantes :

$$\mathbf{grad}U = \begin{pmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial U}{\partial y} \\ \frac{\partial U}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

**Exemple 1** :  $U = X^2 + Y^2 + Z^2$ ,  $\mathbf{grad}U$  est le vecteur de composantes :

$$\mathbf{grad}U = (2X, 2Y, 2Z)^T \quad (6.5)$$

où  $T$  désigne transposé.

**Exemple 2** :

$$U = \frac{1}{r} \quad (6.6)$$

comme  $r^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 \implies 2rdr = 2XdX + 2YdY + 2ZdZ$

$$\mathbf{grad}U = \left( \frac{-X}{r^3}, \frac{-Y}{r^3}, \frac{-Z}{r^3} \right)^T \quad (6.7)$$

Si on pose :

$$\mathbf{r} = \mathbf{OM} = X\mathbf{i} + Y\mathbf{j} + Z\mathbf{k} \quad (6.8)$$

alors :

$$\mathbf{F} = -\frac{\mathbf{r}}{r^3} \quad (6.9)$$

On calcule maintenant le gradient de la fonction scalaire donnée par l'équation (6.3) c'est-à-dire le champ du potentiel. En utilisant l'exemple 2, on a :

$$\mathbf{grad}V = \mathbf{grad} \left( \frac{Gmm'}{r} \right) = Gmm' \mathbf{grad} \left( \frac{1}{r} \right) = -Gmm' \frac{\mathbf{r}}{r^3} \quad (6.10)$$

On remarque si on pose :

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{r}}{r} \quad (6.11)$$

$\mathbf{n}$  est alors un vecteur unitaire porté par  $OM$  et dans la direction  $OM$ . L'expression de la force  $\mathbf{F}$  s'écrit :

$$\mathbf{F} = -F\mathbf{n} = -\frac{Gmm'}{r^2}\mathbf{n} \quad (6.12)$$

$$\mathbf{grad}V = -\frac{Gmm'}{r^2}\mathbf{n} \quad (6.13)$$

D'où :

$$\boxed{\mathbf{F} = \mathbf{grad}V} \quad (6.14)$$

On dit que la force  $\mathbf{F}$  dérive du champ de potentiel  $V$ .

### 6.2.3. Le Laplacien<sup>2</sup>

**Définition 6.4** On appelle laplacien d'une fonction scalaire  $U(X,Y,Z)$  la fonction scalaire notée  $\Delta U$  définie par :

$$\boxed{\Delta U(X,Y,Z) = \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2}} \quad (6.15)$$

### 6.2.4. Le Champ Réel ou Champ du Potentiel de la Pesanteur

Soit le repère  $OXYZ$  tel que  $O$  soit le centre de gravité de la Terre et  $OZ$  son axe de rotation. Le plan  $OXY$  contient le méridien de Greenwich (**Fig. 6.3**). Un point  $M(X,Y,Z)$  de masse unité est soumis au potentiel  $V$  de gravitation et au potentiel  $\Phi$  de la force centrifuge due à la rotation de la Terre.

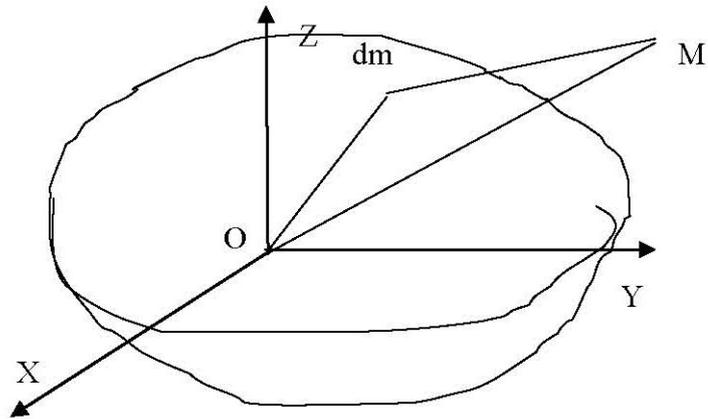
L'expression de  $V$  est :

$$V = G \iiint_{Terre} \frac{dm}{r} \quad (6.16)$$

Malheureusement, cette expression n'est pas calculable car nous ignorons la distribution des masses à l'intérieur de la Terre.

---

2. Nommé à l'honneur de **Pierre Simon de Laplace** (1749-1827) : mathématicien français.



**Fig. 6.3** Le potentiel

L'expression du potentiel  $\Phi$  de la force centrifuge est donnée par :

$$\Phi = \frac{1}{2} (x^2 + y^2) \Omega^2 \quad (6.17)$$

où  $\Omega$  est la vitesse de la rotation de la Terre.

**Définition 6.5** On appelle *Potentiel du champ réel  $W$  ou potentiel de la pesanteur* la somme du potentiel  $V$  et  $\Phi$  :

$$W = V + \Phi \quad (6.18)$$

**Définition 6.6** On appelle *vecteur de gravité* le vecteur  $\mathbf{g}$  tel que :

$$\mathbf{g} = \mathbf{grad}W \quad (6.19)$$

$g$  mesure la gravité ou la pesanteur, a la dimension d'une accélération et exprimée en  $m/s^2$  (Unité Système International) ou en  $cm/s^2$  ( $1cm/s^2 = 1gal$  en hommage à Galilée).  $g$  mesure 978 *gals* à l'équateur et 983 *gals* aux pôles.

**Définition 6.7** *Les surfaces  $W(X, Y, Z) = W_0 = \text{constante}$ , sur lesquelles le potentiel  $W$  est constant sont appelées surfaces équipotentielles ou surfaces de niveau.*

En différentiant le potentiel  $W = W(X, Y, Z)$ , on obtient :

$$dW = \frac{\partial W}{\partial x} dX + \frac{\partial W}{\partial y} dY + \frac{\partial W}{\partial z} dZ \quad (6.20)$$

ou en notation vectorielle :

$$dW = \mathbf{grad}W \cdot d\mathbf{M} = \mathbf{g} \cdot d\mathbf{M} \quad (6.21)$$

Si  $d\mathbf{M}$  est pris sur la surface équipotentielle  $W = W_0$  :

$$dW = 0 \implies \mathbf{g} \cdot d\mathbf{M} = 0 \implies \mathbf{g} \perp d\mathbf{M} \quad (6.22)$$

alors (6.22) exprime que le vecteur  $\mathbf{g}$  est normal à la surface équipotentielle passant par le même point.

### 6.2.5. Le Géoïde

Une première définition du **géoïde** est due à C.F. Gauss (*W.A. Heiskanen & H. Moritz, 1967*) :

*” Ce que nous appelons dans le sens géométrique la surface de la terre ce n'est que la surface qui coupe les lignes de la pesanteur sous un angle droit et qui fait partie de la surface des océans”.*

Le terme géoïde fut introduit pour la première fois par J. Listing<sup>3</sup> en 1872 (*M. Burša & K. Pěč, 1986*) : *” nous appellerons la surface mathématique de la terre définie précédemment la surface à laquelle les océans font partie, surface géodale de la terre ou géoïde ”.*

La surface des liquides et des fluides se met en équilibre perpendiculairement à la verticale. Si on considérait un ensemble fluide recouvrant toute la Terre, il

---

3. **Johann Benedict Listing** (1808-1882) : mathématicien prussien (élève de C.F. Gauss).

définissait donc une surface de niveau de la pesanteur.

La surface moyenne du niveau des mers, abstraction faite des marées et corrigée des variations, définissait une surface de niveau unique pour le monde entier. On peut définir d'autres surfaces de niveau de proche en proche à partir d'un point quelconque pris comme origine sur une verticale donnée, par la condition que cette surface soit en tout point perpendiculaire à toutes les autres verticales.

Ces surfaces de niveau successives que l'on peut numéroter sont des surfaces fermées qui s'enveloppent les unes les autres, un autre exemple ce sont les surfaces de même pression atmosphérique (isobares) sont théoriquement des surfaces de niveau.

Comme par définition, une surface de niveau est normale aux lignes de forces et que ces lignes sont des courbes gauches, les surfaces de niveau ne sont pas parallèles entr'elles, c'est-à-dire que la distance de deux surfaces de niveau n'est pas constante, ce qui reste constant c'est le travail qu'il faut accomplir contre la pesanteur pour déplacer une masse d'un point donné de ces surfaces à un point quelconque d'une autre de celles-ci.

**Définition 6.8** *On appelle géoïde la surface de niveau qui coïncide avec la surface moyenne des mers et qui se prolonge sous les continents par la condition d'y rester normale à toutes les lignes de forces.*

On peut dans ces conditions considérer que la Terre est constituée par le géoïde, surmontée du relief dont l'altitude au dessus du niveau moyen de la mer sera par définition égale à la distance qui le sépare du géoïde. L'expérience prouve que le géoïde s'écarte très peu d'un ellipsoïde de révolution : parceque le géoïde a une expression mathématique très compliquée, alors nous utilisons en géodésie comme surface mathématique du géoïde celle de l'ellipsoïde de révolution.

Le géoïde est donc une surface physique dont la modélisation mathématique est assez compliquée.

L'un des buts de la géodésie est de déterminer la position de cette surface par rapport à la surface topographique.

Généralement, l'origine des réseaux du nivellement de précision est déterminée à partir des mesures du niveau moyen des mers enregistrées par un marégraphe.

Alors, on a la relation suivante entre l'altitude du nivellement ( $H$ ) et l'altitude ellipsoïdale ( $he$ ) :

$$\boxed{he = H + N} \quad (6.23)$$

où  $N$  désigne la hauteur du géoïde par rapport à l'ellipsoïde de référence ou ondulation du géoïde (à ne pas confondre avec la grande normale donnée par l'équation (5.17)).

### 6.3 Les Systèmes de Coordonnées

A chaque système géodésique, on lui associe un système de coordonnées avec lesquelles seront exprimées les positions des points géodésiques.

#### 6.3.1. Les Coordonnées Sphériques

Un point  $M$  est défini par le triplet  $(r, \lambda, \theta)$ . Les coordonnées de  $M$  s'expriment ainsi :

$$M = \begin{cases} X = r \sin \theta \cos \lambda \\ Y = r \sin \theta \sin \lambda \\ Z = r \cos \theta \end{cases} \quad (6.24)$$

avec :

$r$  : la distance géocentrique,

$\lambda$  : la longitude,

$\theta$  : le complément à la latitude géocentrique.

#### 6.3.2. Les Coordonnées Géodésiques

Pour le modèle ellipsoïdique de la Terre, les coordonnées  $(X, Y, Z)$  d'un point  $M$  s'expriment par les formules :

$$M = \begin{cases} X = (N + he) \cos \varphi \cos \lambda \\ Y = (N + he) \cos \varphi \sin \lambda \\ Z = (N(1 - e^2) + he) \sin \varphi \end{cases} \quad (6.25)$$

avec :

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$$

$a$ ,  $e$  et  $he$  sont respectivement le demi-grand axe, la première excentricité de l'ellipsoïde de référence et l'altitude ellipsoïdique au point concerné.

Ces coordonnées sont dites des coordonnées géométriques.

### 6.3.3. Les Coordonnées Naturelles ou Géoïdales ou physiques

**Définition 6.9** On appelle coordonnées naturelles, géoïdales ou physiques le triplet  $(\Phi, \Lambda, H)$  avec  $(\Phi, \Lambda)$  sont respectivement la latitude et la longitude astronomiques.

Ces coordonnées se rapportent à la verticale du lieu (définie par la direction donnée par un fil à plomb). La notion de la verticale est une notion fondamentale car elle correspond à une mesure physique. Elle n'est pas à confondre avec celle de la normale à l'ellipsoïde.

### 6.3.4. La Déviation de la verticale

Si en un point donné, on a mesuré  $(\Phi, \Lambda, H)$  et on a déterminé  $(\varphi, \lambda, he)$ , généralement on a :

$$\Phi \neq \varphi \quad (6.26)$$

$$\Lambda \neq \lambda \quad (6.27)$$

$$H \neq he \quad (6.28)$$

On dit qu'on a une déviation de la verticale en ce point.

**Définition 6.10** On définit les composantes de la déviation de la verticale par :

$$\begin{array}{l} \zeta = \Phi - \varphi \\ \eta = (\Lambda - \lambda) \cos \varphi \end{array} \quad (6.29)$$

$\zeta$  et  $\eta$  sont respectivement les composantes Nord et Est de la déviation de la verticale.

L'objet principal de la Géodésie est la détermination en chaque point de la Terre de  $\zeta$ ,  $\eta$  et  $N = he - H$ .

## 6.4 Les Systèmes Géodésiques en Afrique du Nord

Les systèmes géodésiques terrestres de la Tunisie seront présentés au chapitre consacré à la Géodésie Tunisienne [§ 10].

### 6.4.1. Les Systèmes Géodésiques en Algérie

**Le Système Voirol :** C'était le premier système défini en Algérie (1875) :

- le point fondamental (point de départ) : Voirol (près d'Alger) créé en 1875 ;
- la surface de référence : c'est-à-dire le modèle choisi pour la Terre est l'ellipsoïde de Clarke<sup>4</sup> Français 1880 ( $a = 6\,378\,249.20\,m$ ,  $e^2 = 0.0068034877$ ) avec  $a$  le demi-grand axe de l'ellipsoïde et  $e$  la première excentricité ;
- l'orientation de départ est l'azimut astronomique de la direction Voirol-Meleb El Kora mesuré en 1874 ;
- la mise à l'échelle ou la qualité métrique de réseau : la mesure d'une distance ou base à Blida en Algérie mesurée en 1854.

**Le Système Europe 50 :** Le système était mis en place par les Américains pour le besoin de l'OTAN (Organisation du Traité de l'Atlantique Nord) en faisant une compensation générale des réseaux de l'Europe Occidentale en associant les chaînes de triangles de l'Afrique du Nord. Il est défini par les éléments suivants :

- le point fondamental : Potsdam (Allemagne) ;
- l'azimut d'orientation : l'azimut astronomique de la direction Potsdam-Golmberg ;

---

4. Voir note historique ci-après.

- l'ellipsoïde de référence : l'ellipsoïde international de Hayford :<sup>5</sup>

$$a = 6\,378\,388.000\,m, \quad f = 1/297.000$$

**Le Système BT56** : Les éléments de définition de ce système géodésique terrestre sont :

- le point fondamental : point Bouzaréah ;

- l'ellipsoïde de référence : l'ellipsoïde de Clarke 1880 Anglais :

$$a = 6\,378\,249.145\,m, \quad e^2 = 0.0068\,0351\,128$$

- l'orientation est assurée par trois gisements astronomiques traités en équations de condition.

**Le Système Nord Sahara** : Ce système a été défini par une transformation conforme des coordonnées du système Europe 50 de l'ellipsoïde international de Hayford sur l'ellipsoïde de Clarke 1880 Anglais.

### 6.4.2. Les Systèmes Géodésiques en Libye

**Le Système Europe 50** : Ce système était utilisé dans la fin des années 50 et le début des années 60, il était mis en place par l'AMS (Army Map Service) des Etats-Unis. Le réseau géodésique comprenait une chaîne de triangles le long de la côte de la frontière Tuniso-Libyenne à la frontière Egypto-Libyenne et rattaché au système Europe 50 précédemment défini ci-dessus.

**Le Système LYB79** : Ce système est défini par une compensation générale des points du système Europe 50 avec 45 points observés par la méthode Doppler<sup>6</sup>. L'ellipsoïde de référence est l'ellipsoïde international de Hayford.

### 6.4.3. Les Systèmes Géodésiques au Maroc

**Le Système Merchich** : Il a été observé en 1922 ayant les éléments suivants :

5. **John Fillmore Hayford** (1868-1925) : géodésien américain.

6. **Christian Doppler** (1803-1853) : mathématicien et physicien autrichien.

- le point fondamental : le point Merchich (près de Casablanca au Maroc) ;
- l'ellipsoïde de référence est l'ellipsoïde de Clarke 1880 Français ;
- l'azimut d'orientation : l'azimut astronomique de la direction Merchich-Berchid.

### 6.5 Caractéristiques des Ellipsoïdes Géodésiques

Nom de l'Ellipsoïde	Demi-grand axe Demi-petit axe	$1/f$	$e^2$	Paramètres de définition
Clarke Français 1880	6378249.200 6356515.000	293.46602	0.0068034877	$a, b$
Clarke Anglais 1880	6378249.145 6356514.8696	293.46500	0.00680351128	$a, 1/f$
Hayford 1909 ou International 1924	6378388.000 6356911.940	297.00000	0.0067226700	$a$ $1/f$
Krassovsky <sup>7</sup>	6378245.000 6356863.0188	298.30000	0.00669342162	$a, 1/f$
GRS 1967 (AIG)	6378160.000 6356774.516	298.24717	0.0066946053	$a, e^2$
NWL 8	6378145.000 6356759.770	298.25000	0.0066945419	$a, 1/f$
WGS72	6378135.000 6356750.520	298.26000	0.0066943178	$a, 1/f$
AIG 1975	6378140.000 6356755.288	298.25700	0.0066943850	$a, 1/f$
APL Navigation	6378144.000 6356757.339	298.23000	0.0066949901	$a, 1/f$
GRS80 (AIG)	6378137.000 6356752.3141	298.257222101	0.0066943800229	$a, b$
WGS84	6378137.000 6356752.3142	298.257223563	0.0066943799	$a, 1/f$

**Tableau 6.1** Caractéristiques des ellipsoïdes géodésiques (*H. Moritz, 2000 ; C. Boucher, 1979a ; DMA, 1987b*)

**Note historique :** L'ellipsoïde de Clarke 1880 Français a été déterminé par le géodésien anglais Clarke A. R.<sup>8</sup> entre les années 1878 et 1880. La méthode de détermination se repose sur des observations obtenues par les mesures d'arcs de méridiens de la Terre ainsi que les observations des latitudes géodésiques des points d'extrémités appuyés par la détermination de latitudes astronomiques.

A partir de la formule donnant la longueur d'un arc de la méridienne compris entre les latitudes géodésiques  $\varphi$  et  $\varphi'$ , on écrit l'équation d'observation relative à la méthode des moindres carrés en partant d'un ellipsoïde approché de paramètres, dans la notation usuelle,  $(a_0, b_0, e_0)$  soit :

$$\begin{cases} ds + s_{cal} - s_{obs} = v \\ \text{avec : } s_{cal} = a_0(1 - e_0^2) \int_{\varphi}^{\varphi'} (1 - e_0^2 \sin^2 t)^{-\frac{3}{2}} dt \end{cases}$$

Clarke A.R. avait introduit le coefficient  $n = \frac{a_0 - b_0}{a_0 + b_0}$ , alors  $s_{cal}$  s'écrit (à vérifier à titre d'exercice) :

$$s_{cal} = s_{cal}(b_0, n) = b_0(1 + n)(1 - n^2) \int_{\varphi}^{\varphi'} (1 + 2n \cos 2t + n^2)^{-\frac{3}{2}} dt$$

Il exprimait  $ds$  en fonction de  $db_0$  et  $dn$  et il avait utilisé 56 observations d'arcs ou portions d'arcs. Les résultats obtenus sont :

- pour l'Angleterre :  $a = 6378249.14533m$  arrondi à  $6378249.145m$  et l'aplatissement  $f = 1/293.465$ , c'est l'ellipsoïde de Clarke 1880 Anglais. Il ne sera pas utilisé pour la cartographie de la Grande-Bretagne mais c'est plutôt l'ellipsoïde d'Airy<sup>9</sup>.

- pour la France :  $a = 6378249.20m$ ,  $b = 6356515.00m$  et  $f = 1/293.4660208$ . C'est l'ellipsoïde de Clarke 1880 Français. Il a été adopté en 1922 pour la carte de France et celles de l'Afrique du Nord. (H. Monge, 1979)

## 6.6 Exercices et Problèmes

**Exercice 6.1** Donner l'expression des composantes du gradient en coordonnées cylindriques.

8. Clarke Alexander Ross (1828-1914) : géodésien anglais.

7. Feodosy Nikolaevich Krassovsky (1878 - 1948) : astronome et géodésien russe.

9. George Biddell Airy (1801-1892) : mathématicien et astronome anglais.

**Exercice 6.2** On donne l'expression scalaire d'une fonction  $V(x, y, z)$  par :

$$V(x, y, z) = \frac{ax^2 + y^2}{z^2} + \frac{1}{2}\omega^2(x^2 + y^2)$$

1. Calculer les composantes du vecteur  $\mathbf{grad}V$  dans un domaine de  $\mathbb{R}^3$  où  $z \neq 0$ .

**Problème 6.1** Soit un point  $A(\varphi, \lambda)$  sur un ellipsoïde de révolution associé à un référentiel géocentrique donné  $\mathcal{R}$ . On considère le repère orthonormé local en  $A$   $(e_\lambda, e_\varphi, e_n)$  défini dans la base orthonormée  $(i, j, k)$  de  $\mathcal{R}$  où  $e_\lambda$  est tangent au parallèle passant par  $A$  et dirigé vers l'Est,  $e_\varphi$  tangent à la méridienne, dirigé vers le nord et  $e_n$  porté par la normale à l'ellipsoïde dirigé vers le zénith.

1. Exprimer les vecteurs de la base  $(e_\lambda, e_\varphi, e_n)$  dans la base  $(i, j, k)$  de  $\mathcal{R}$ .
2. Exprimer les vecteurs  $i, j$  et  $k$  dans la base  $(e_\lambda, e_\varphi, e_n)$ .
3. Calculer  $de_\lambda, de_\varphi$  et  $de_n$  dans la base  $(i, j, k)$ .
4. En adoptant une écriture matricielle, montrer que :

$$\begin{pmatrix} de_\lambda \\ de_\varphi \\ de_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \sin\varphi d\lambda & -\cos\varphi d\lambda \\ -\sin\varphi d\lambda & 0 & -d\varphi \\ \cos\varphi d\lambda & d\varphi & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_\lambda \\ e_\varphi \\ e_n \end{pmatrix}$$

**Problème 6.2** On considère les notations du précédent problème. Soit un point  $M$ . On pose :

$$\Delta X = (X_M - X_A, Y_M - Y_A, Z_M - Z_A)^T, \Delta x = (x_M, y_M, z_M)^T$$

où  $X$  et  $x$  sont respectivement les composantes du vecteur  $AM$  dans les repère  $\mathcal{R}$  et le repère local en  $A$ .

1. Montrer qu'on a la relation :  $\Delta X = J.\Delta x$  avec  $J$  une matrice orthogonale ( $J^{-1} = J^T$ ) qu'on déterminera.
2. On suppose maintenant que  $\mathcal{R}$  est le repère GPS et que le passage du repère  $\mathcal{R}$  vers le repère terrestre est donné par le modèle dit à 7 paramètres (§ 14) :

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} &= F(X) = \begin{pmatrix} Tx \\ Ty \\ Tz \end{pmatrix} + (1+m).R. \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} Tx \\ Ty \\ Tz \end{pmatrix} + (1+m). \begin{pmatrix} 1 & rz & -ry \\ -rz & 1 & rx \\ ry & -rx & 1 \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \end{aligned}$$

On note :  $\delta X = F(\Delta X) - \Delta X$ , que représente  $\delta X$ . Montrer qu'au premier ordre que :

$$\delta X \cong m\Delta X + (R - I)\Delta X$$

3. On appelle  $\omega = (rx, ry, rz)^T$ , montrer que :

$$\|\delta X\| = (m^2 + \omega^2 \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}} \|\Delta X\|$$

où  $\theta$  est l'angle entre les vecteurs  $\Delta X$  et  $\omega$ .

4. En déduire que :

$$|m| \cdot \|\Delta X\| \leq \|\delta x\| \leq (m^2 + \omega^2)^{\frac{1}{2}} \|\Delta X\|$$

5. En utilisant la relation liant  $\Delta X$  et  $\Delta x$ ; montrer que :

$$\delta x = m\Delta x + J^T(R - I)J\Delta x$$

**Problème 6.3** On définit dans  $\mathbb{R}^3$  un point  $M$  par ses coordonnées ellipsoïdiques de Jacobi  $(\phi, \lambda, u)$  comme suit :

$$M \begin{cases} x = \sqrt{u^2 + \epsilon^2} \cdot \cos \phi \cos \lambda \\ y = \sqrt{u^2 + \epsilon^2} \cdot \cos \phi \sin \lambda \\ z = u \cdot \sin \phi \end{cases}$$

avec :  $\epsilon^2 = \sqrt{a^2 - b^2}$ ,  $\phi \in [-\pi/2, \pi/2]$ ,  $\lambda \in [0, 2\pi]$  et  $u \in ]0, +\infty[$ ,  $a, b$  deux constantes réelles telles que  $a > b > 0$ .

1. Montrer que le point  $M$  appartient à un ellipsoïde de révolution en précisant ses demi-axes.

2. Calculer  $ds^2$  et montrer qu'il s'écrit sous la forme :

$$ds^2 = (d\phi, d\lambda, du) \cdot G \cdot \begin{pmatrix} d\phi \\ d\lambda \\ du \end{pmatrix}$$

avec  $G$  donnée par :

$$G = (g_{ij}) = \begin{pmatrix} u^2 + \epsilon^2 \sin^2 \phi & 0 & 0 \\ 0 & (u^2 + \epsilon^2) \cos^2 \phi & 0 \\ 0 & 0 & \frac{u^2 + \epsilon^2 \sin^2 \phi}{u^2 + \epsilon^2} \end{pmatrix}$$

3. Sachant que l'expression du laplacien d'une fonction scalaire  $V$  en coordonnées de Jacobi est exprimée par :

$$\Delta V = \frac{1}{\sqrt{g}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \frac{\sqrt{g}}{g_{11}} \cdot \frac{\partial V}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \frac{\sqrt{g}}{g_{22}} \cdot \frac{\partial V}{\partial \lambda} \right) + \frac{\partial}{\partial u} \left( \frac{\sqrt{g}}{g_{33}} \cdot \frac{\partial V}{\partial u} \right) \right\}$$

où  $g$  est le déterminant de la matrice  $G$ , donner l'expression de  $\Delta V$ .

4. Calculer  $\Delta V$  sachant que  $V$  est donnée par :

$$V(\phi, u) = \frac{GM}{\epsilon} \operatorname{Arctg} \frac{\epsilon}{u} + \frac{1}{3} a^2 \omega^2 \frac{q}{q_0} \left( 1 - \frac{3}{2} \cos^2 \phi \right) + \frac{1}{2} \omega^2 (u^2 + \epsilon^2) \cos^2 \phi$$

avec  $G, M$  et  $\omega$  des constantes et :

$$q = q(u) = \frac{1}{2} \left[ \left( 1 + 3 \frac{u^2}{\epsilon^2} \right) \operatorname{Arctg} \frac{\epsilon}{u} - 3 \frac{u}{\epsilon} \right]$$

$$q_0 = q(u = b) = \frac{1}{2} \left[ \left( 1 + 3 \frac{b^2}{\epsilon^2} \right) \operatorname{Arctg} \frac{\epsilon}{b} - 3 \frac{b}{\epsilon} \right]$$

**Problème 6.4** Avec les notations usuelles, un potentiel est donné avec les constantes  $(GM, a, J_2, \omega)$  de GRS80 par :

$$W(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r} \left( 1 - J_2 \frac{a^2}{r^2} P_2(\cos \theta) \right) + \frac{\omega^2}{2} r^2 \sin^2 \theta$$

où  $(r, \theta, \lambda)$  sont les coordonnées sphériques du point de calcul et :

$$a = 6378137.00 \text{ m}, b = 6356752.31 \text{ m};$$

$$GM = 3986005 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2};$$

$$\omega = 7292115 \times 10^{-11} \text{ rad.s}^{-1};$$

$$J_2 = 108263 \times 10^{-8}.$$

1. Calculer le potentiel  $W$  aux points suivants situés sur l'ellipsoïde GRS80 :

\* le Pôle Nord;

\* sur l'équateur;

\* au point  $A$  sur l'ellipsoïde avec  $\theta_A = 34^\circ$ .

2. Calculer les variations de  $W$  entre les 3 points.

3. Exprimer le potentiel  $W$  en coordonnées cartésiennes  $(X, Y, Z)$ .

$$\text{On rappelle : } P_2(\cos \theta) = \frac{1}{2} (3 \cos^2 \theta - 1).$$

# Chapitre 7

## *Les Réseaux Géodésiques*

### 7.1 Introduction

L'un des buts de la Géodésie est l'établissement des réseaux géodésiques dans un territoire donné. Ces réseaux géodésiques vont constituer l'ossature des travaux cartographiques et topographiques.

Généralement, la région à cartographier est une zone vaste très étendue. Les procédés topographiques comme les polygonales ne peuvent pas être utilisés et c'est dû :

- premièrement, la surface topographique n'est pas un plan mais plutôt un sphéroïde. Ainsi la sphéricité de la Terre est négligée dans les travaux topographiques. De plus, les corrections de la représentation plane ne sont pas prises en compte ;
- deuxièmement, vu l'étendue de la zone, les levés topographiques ne peuvent pas être faits à partir d'une seule polygonale. On est amené à faire plusieurs polygonales, celles-ci sont déterminées les unes indépendantes des autres ainsi que leurs compensations ou ajustements.

Le groupement de ces polygonales va cumuler les erreurs dès qu'on s'éloigne de la polygonale choisie polygonale de départ. Aussi, on ne peut laisser les erreurs, tolérées pour une polygonale, se cumuler et falsifier la position des points.

Le but de la géodésie est donc la détermination avec précision des coordonnées de ces points dispersés sur tout le territoire, objet de la carte.

## 7.2 Les Réseaux Géodésiques Classiques

### 7.2.1. Conception d'un Réseau Géodésique

Un réseau géodésique est généralement constitué par une chaîne de triangles où les sommets représentent les points géodésiques souvent matérialisés aux sommets des montagnes et des constructions et bâtiments élevés (châteaux d'eau, phares,...). Ce réseau de triangles couvre l'ensemble du territoire.

### 7.2.2. Point Fondamental

Le réseau sera déterminé de proche en proche à partir d'un premier point. Ce point est appelé Point Fondamental du réseau géodésique ou du système géodésique associé. En ce point, on détermine  $(\Phi, \Lambda)$  respectivement la latitude et la longitude astronomiques à partir d'observations sur des étoiles. La méthode la plus utilisée était celle des hauteurs égales. On observe aussi l'azimut astronomique de la direction vers un deuxième point. Cet azimut sera déterminé à partir de l'observation astronomique de l'étoile polaire. L'orientation du réseau est définie à partir de l'azimut géodésique  $Azg$  de la direction citée précédemment. Au point fondamental, on prendra par convention :

$$\begin{array}{l} \varphi_{\text{géodésique}} = \Phi \\ \lambda_{\text{géodésique}} = \Lambda \\ Azg = Aza \end{array} \quad (7.1)$$

Ce choix permet de positionner le réseau par rapport à l'ellipsoïde de référence, ce qui implique qu'au point fondamental la normale à l'ellipsoïde est confondue avec la verticale.

Pour déterminer les coordonnées d'un deuxième point  $M_2$ , il faut mesurer la distance  $M_1M_2$ . A partir des calculs géodésiques sur l'ellipsoïde, on peut déterminer  $(\varphi_2, \lambda_2)$  du point  $M_2$  connaissant  $(\varphi_1, \lambda_1)$  du point  $M_1$ ,  $Az_1$  et  $M_1M_2$ .

### 7.2.3. Mise à l'Echelle

La mesure de la distance définit la mise à l'échelle du réseau. En général, on mesure une base de quelques kms (exemple 10 kms), par des opérations de mesures angulaires, cette base est intégrée au réseau géodésique ce qu'on appelle '**amplification de la base**'.

### 7.2.4. Processus de Réalisation

La méthode la plus utilisée dans le processus de réalisation d'un réseau géodésique terrestre était la triangulation : soit la mesure des angles des triangles. Ces angles sont obtenus par différences de lectures entre les points et mesurés à l'aide des théodolites de haute précision comme le TH3 par la méthode des tours d'horizon. Un premier contrôle de la qualité des observations s'obtient par le calcul de la fermeture des triangles géodésiques. Soit  $\epsilon$  l'excès sphérique d'un triangle en grades, on détermine  $\hat{F}$ , la fermeture du triangle, par :

$$\boxed{\hat{F} = \hat{A} + \hat{B} + \hat{C} - 200\text{ gr} - \epsilon} \quad (7.2)$$

où  $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}$  sont les angles bruts mesurés du triangle.

En fonction des longueurs des côtés des triangles, la fermeture des triangles doit être inférieure à la tolérance requise.

### 7.2.5. Equation de Laplace et Contrôle de la qualité du réseau géodésique

Pour contrôler la qualité du réseau géodésique, on observe généralement tous les 200 kms un point de Laplace, soit la détermination de  $\varphi_a, \lambda_a$  et  $Aza$ . On

montre qu'en un point  $M$  de coordonnées géodésiques  $(\varphi_g, \lambda_g)$  le passage d'un azimut astronomique  $Aza$  d'une direction observée en  $M$  à l'azimut géodésique de la même direction est donné par la formule dite équation de Laplace :

$$\boxed{Azg = Aza - (\lambda_g - \lambda_a) \sin \varphi} \quad (7.3)$$

où  $\lambda_a$  est la longitude astronomique de  $M$  et  $\varphi$  est la latitude géodésique  $(\varphi_g)$  ou la latitude astronomique  $(\Phi_a)$ .

A l'aide de l'équation de Laplace citée ci-dessus, on contrôle la fermeture Laplacienne par :

$$\boxed{E = Azg - Aza - (\lambda_g - \lambda_a) \sin \varphi} \quad (7.4)$$

De même, on observe aussi une base pour améliorer la qualité de l'échelle du réseau géodésique.

### 7.3 La Géodésie Spatiale

La géodésie spatiale a connu un essor dans la mise en place des réseaux géodésiques à partir des années 80 par l'utilisation de la méthode Doppler. Cette méthode repose sur l'effet dit Doppler sur les signaux émis par les satellites en mouvement et qui sont reçus par un récepteur centré en position sur le point géodésique. Le traitement des données enregistrées permet la détermination des coordonnées géocentriques du point géodésique  $(X, Y, Z)$  ou  $(\varphi, \lambda, he)$  dans un système géodésique bien défini.

La technique Doppler a été remplacée par la méthode de positionnement par les satellites GPS (**G**lobal **P**ositioning **S**ystem). Ce système permet d'observer en tout point de la Terre et en tout instant au moins quatre satellites de la constellation des satellites GPS (*B. Hofmann-Wellenhof - H. Lichtenegger - J. Collins, 1992*).

#### 7.3.1. Le Système de Référence WGS84

Le système WGS84 (**W**orld **G**eodetic **S**ystem 84) est le système lié aux satellites GPS. C'est un système géocentrique  $(O, X, Y, Z)$ , c'est-à-dire :

- son origine  $O$  est le centre des masses de la Terre ;
- l'axe  $OZ$  est confondu avec l'axe de la rotation de la Terre défini par le BIH (Bureau International de l'Heure) à l'instant 1984.0 ;
- le plan  $OXY$  contient le méridien origine des longitudes ;
- l'axe  $OY$  est perpendiculaire à  $OXY$  tel que  $(O, X, Y, Z)$  soit un système direct.

A ce système est associé l'ellipsoïde de référence appelé ellipsoïde *WGS84* avec  $a = 6378137.00\text{ m}$  et  $1/f = 298.25722356340697$  (DMA, 1987a - 1987b - 1987c).

### 7.3.2. Le Système de Référence *ITRF*

Le système *WGS84* a une précision absolue de  $1\text{ m}$ . Pour avoir une précision centimétrique, la communauté géodésique internationale représentée par l'Association Internationale de Géodésie (AIG)<sup>1</sup> a défini un système géocentrique très proche du système *WGS84* dont la précision est centimétrique. Ce système est appelé le système *ITRF* (**I**nternational **T**errestrial **R**eference **F**rame) associé à l'ellipsoïde *GRS80* défini par l'AIG avec ses paramètres  $a = 6378137.00\text{ m}$  et  $1/f = 298.25722210088378$  ou  $e^2 = 0.006694380023$  (*H. Moritz, 2000*). Comme le système *WGS84*, le système *ITRF* est géocentrique. Ce système est défini à partir de 1989 c'est pourquoi, on parle du système *ITRF89* comme système utilisé par la communauté géodésique internationale.

### 7.3.3. La Détermination d'un Nouveau Réseau Géodésique

La méthode de positionnement par GPS a révolutionné la détermination des réseaux géodésiques. On décrit ci-dessous le cas de la mise en place d'un nouveau réseau géodésique dans un pays.

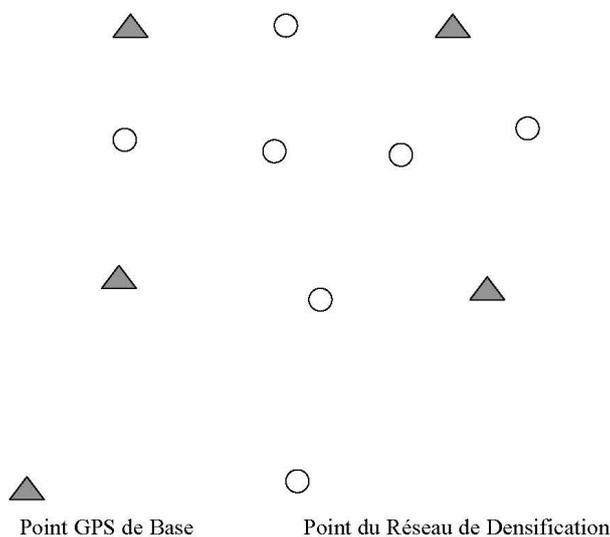
---

1. AIG : l'Association Internationale de Géodésie est l'une des huit associations de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale (UGGI) ([www.iag-aig.org](http://www.iag-aig.org)).

### Observations du Réseau Géodésique GPS de Base

La technique GPS (*B. Hofmann-Wellenhof - H. Lichtenegger - J. Collins, 1992*) ne nécessite plus le stationnement des points sur les sommets des montagnes pour faciliter le passage des visées entre les points. On choisit alors un ensemble de points d'accès facile, formant le Réseau Géodésique GPS de Base. Après la phase de la construction de ces points, on passe à la phase des observations par l'emploi de récepteurs GPS bi-fréquences avec au moins 3 récepteurs pour avoir une base commune. La durée des observations dépendra de la distance moyenne entre les points. Supposons que cette moyenne soit de l'ordre de 120-150 kms, alors la durée des observations est au minimum 3 sessions de 8 heures (une session est une durée d'observations sans interruption). On paramètre les récepteurs de façon à enregistrer tous les 30 s les signaux émis par les satellites GPS qui se trouvent à  $10^\circ$  au-dessus de l'horizon des stations.

**Exemple :** on a à déterminer 6 points  $n_i$ ,  $\frac{1}{2}$  1, 2, 3, 4, 5 et 6 avec 3 récepteurs (**Fig. 7.1**). Les observations seront faites comme suit :



**Fig. 7.1** Canevas des points

Jour $n_i \frac{1}{2}$	Points observés
1-2-3	1-2-3
4-5-6	2-3-4
7-8-9	3-6-4
10-11-12	5-6-4
13-14-15	5-4-2

Tableau 7.1 Table des observations GPS

#### 7.3.4. Calculs des points du Réseau Géodésique GPS de Base

Le système *ITRF* est défini par un ensemble de stations dont les coordonnées sont connues avec précision. Ces points serviront comme points fixes dans le calcul des coordonnées des points du réseau géodésique GPS de base d'un pays. En effet, les observations de ces points sont accessibles via l'Internet et on récupère les données observées dans la même période. Parmi les points les plus proches, par exemple, des pays de l'Afrique du Nord, on cite les stations Matera et Cagliari (Italie), Grasse (France) et Madrid (Espagne).

Pour calculer les coordonnées des points nouveaux, on utilise les éphémérides précises c'est-à-dire les positions précises des satellites au moment des observations. Ces éphémérides seront déterminées deux semaines après les observations par les centres de calculs de l'IGS (International GPS Service) service dépendant de l'AIG.

A la fin des calculs, on obtient les coordonnées géodésiques  $(\varphi, \lambda, he)$  dans le système *ITRF*, ellipsoïde *GRS80*. A partir des formules suivantes :

$$M = \begin{cases} X = (N + he) \cos \varphi \cos \lambda \\ Y = (N + he) \cos \varphi \sin \lambda \\ Z = (N(1 - e^2) + he) \sin \varphi \end{cases} \quad (7.5)$$

on obtient les coordonnées 3D  $(X, Y, Z)$ . Si on dispose d'un modèle de géoïde, on détermine les altitudes orthométriques des points à partir de la relation :

$$h_e = N + H \quad (7.6)$$

avec :

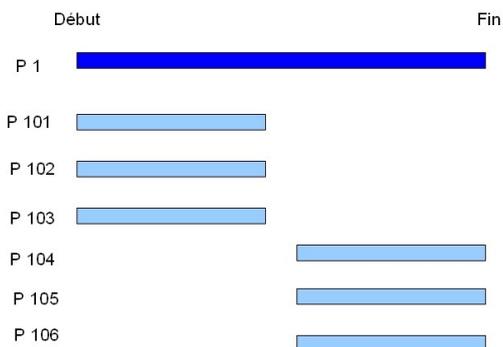
- $N$  désigne ici l'ondulation du géoïde au dessus/au dessous de l'ellipsoïde *GRS80*;
- $h_e$  l'altitude ellipsoïdique GPS;
- $H$  l'altitude orthométrique.

#### 7.4 Densification du Réseau Géodésique GPS de Base

Soit le schéma suivant : la phase des observations se fait comme suit pour 4 récepteurs (**Fig. 7.2**) :

- un récepteur sur un point connu du Réseau GPS de Base (exemple point 1) ;
- les autres récepteurs sur les points nouveaux, par exemple :
  - \* 1ère session (2 à 3 heures) : 1 récepteur sur le point 101, un autre sur le point 102 et un autre sur le point 103 ;
  - \* 2ème session : 1 récepteur sur le point 104, un autre sur le point 105 et un autre sur le point 106.

On aura le schéma suivant pour les observations :



**Fig. 7.2** Sessions de densification d'observations GPS

Les observations se font en groupe de points afin d'obtenir une meilleure détermination des points lors des calculs.

La phase des calculs repose sur la fixation du point 1 dont les coordonnées sont connues et on utilise les éphémérides radiodiffusées portées par les signaux envoyés par les satellites GPS. Nous obtenons les coordonnées géodésiques  $(\varphi, \lambda, he)$  des points nouveaux.

## 7.5 La Densification d'un Réseau Géodésique Terrestre

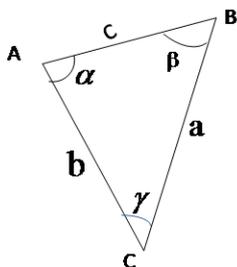
A l'heure actuelle, la méthode de positionnement par GPS est devenue la méthode la plus utilisée pour densifier un réseau géodésique terrestre par de nouveaux points.

La méthodologie est la suivante :

1. observations par GPS d'un ensemble de points anciens délimitant la zone à densifier, le nombre des points anciens est au minimum 3 points. Ces observations permettent de déterminer les paramètres de transformation entre le système GPS et le système géodésique terrestre en vigueur dans un pays ;
2. observations des points nouveaux : la durée des observations dépend de l'ordre des points nouveaux. La méthode des observations des points est la même que celle décrite pour la densification d'un nouveau réseau géodésique ;
3. calculs des observations GPS des points anciens et détermination des paramètres de transformation du système GPS au système géodésique terrestre officiel ;
4. calculs des observations GPS des points nouveaux en fixant les coordonnées GPS des points anciens ;
5. application des paramètres de transformation aux coordonnées GPS pour avoir les coordonnées géodésiques des points nouveaux dans le système géodésique terrestre en vigueur ;
6. calculs des coordonnées planimétriques des points nouveaux dans la représentation plane officielle du pays.

## 7.6 Exercices et Problèmes

**Exercice 7.1** Soit un triangle plan  $ABC$  de côtés respectivement  $a, b$  et  $c$  (**Fig. 7.3**) :



**Fig. 7.3** Le triangle plan

1. A partir de la formule :

$$\cos\alpha = \frac{b^2 + c^2 - a^2}{2bc}$$

exprimer  $d\alpha$  en fonction de  $da, db$  et  $dc$ .

2. Donner l'expression de la variance  $\sigma_\alpha^2$  en fonction des variances des côtés.

3. On considère maintenant que le triangle  $ABC$  est équilatéral et on note  $L = a = b = c$ . Montrer que :

$$\sigma_\alpha = \sqrt{2} \frac{\sigma_L}{L}$$

4. En déduire l'expression de la tolérance de la fermeture du triangle.

# Chapitre 8

## *Réduction des Distances*

### 8.1 Introduction

Souvent dans les travaux géodésiques, on est amené à mesurer des distances entre des points géodésiques à l'aide des distancemètres. Pour pouvoir utiliser ces distances, il faut y apporter des corrections pour réduire ces distances au plan de la représentation plane utilisée.

### 8.2 Corrections des Distances

On donne une distance spatiale  $D$  mesurée par un distancemètre entre deux points  $A$  d'altitude  $H_A$  et  $B$  d'altitude  $H_B$ .

Vue la présence de l'atmosphère, la distance  $D$  est une distance courbe de rayon de courbure  $\rho$  qui dépend du type de l'appareil utilisé.

Soit  $\alpha$  l'angle au centre de rayon de courbure, on a alors :

$$D = \rho\alpha \tag{8.1}$$

De plus, on a :

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{D_P}{2\rho} \quad (8.2)$$

### 8.2.1. Correction de courbure

La correction de courbure est  $C_1$  telle que :

$$C_1 = D_P - D = 2\rho \sin \frac{\alpha}{2} - \rho\alpha = -\rho(\alpha - 2\sin \frac{\alpha}{2}) \quad (8.3)$$

Comme  $\alpha$  est un angle très petit  $< 3i; \frac{1}{2}$ , on peut écrire :

$$\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{\alpha}{2} - \frac{(\alpha/2)^3}{6} + \dots = \frac{\alpha}{2} - \frac{\alpha^3}{48} + \dots$$

soit :

$$C_1 = -\rho(\alpha - \alpha + \frac{\alpha^3}{24} + \dots)$$

D'où :

$$\boxed{C_1 = D_P - D = -\rho \frac{\alpha^3}{24}} \quad (8.4)$$

Pour les distancemètres à ondes lumineuses, on a  $\rho = 8R$  où  $R$  désigne le rayon moyen de la Terre = 6378 km. Pour les distancemètres à ondes centimétriques on a  $\rho = 4R$ . La correction  $C_1$  vaut en fonction de la distance mesurée :

$$C_1 = -\frac{D^3}{24\rho^2} \quad (8.5)$$

**Application :**  $D = 10 \text{ km}$ ,  $\rho = 4R \implies C_1 = -0.06 \text{ mm}$  quantité négligeable.

### 8.2.2. Réduction à l'horizontale

Soit  $H_m = (H_A + H_B)/2$  l'altitude moyenne de la visée  $AB$ ,  $i$  l'angle que fait  $AB$  avec le plan horizontal,  $D_H$  la distance horizontale à l'altitude moyenne.

La correction à l'horizontale est donnée par  $C_2$  telle que :

$$C_2 = D_H - D_P \quad (8.6)$$

Or  $D_H = D_P \cdot \cos i$ , d'où :

$$C_2 = D_P \cos i - D_P = D_P (\cos i - 1) = -2D_P \cdot \sin^2 \frac{i}{2}$$

En posant :

$$\Delta H = H_B - H_A \quad (8.7)$$

alors, on peut écrire que :

$$\sin\left(\frac{i}{2}\right) = \frac{\Delta H}{2D_P}$$

Par suite :

$$\boxed{C_2 = D_H - D_P = -\frac{\Delta H^2}{2D_P}} \quad (8.8)$$

### 8.2.3. Réduction à la surface de référence ou au niveau zéro

Soit  $H_m = (H_A + H_B)/2$  l'altitude moyenne au dessus de l'ellipsoïde.  $R$  le rayon de courbure dans la direction  $AB$ . On a alors :

$$\frac{D_H}{R + H_m} = \frac{D_0}{R} \quad (8.9)$$

La correction  $C_3$  est telle que :

$$C_3 = D_0 - D_H \quad (8.10)$$

Or :

$$D_0 = \frac{R}{R + H_m} D_H \quad (8.11)$$

Par suite :

$$C_3 = \frac{R}{R + H_m} D_H - D_H = -D_H \frac{H_m}{R + H_m}$$

Comme  $H_m$  étant négligeable par rapport au rayon de courbure de l'ellipsoïde de référence, on obtient :

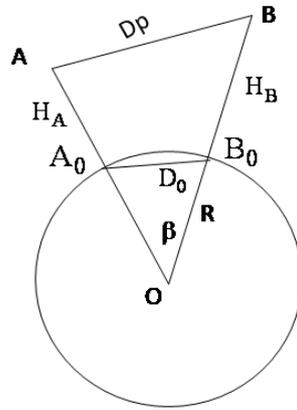
$$\boxed{C_3 = D_0 - D_H = -D_H \frac{H_m}{R}} \quad (8.12)$$

**Exemple Numérique :**  $D_H = 10 \text{ km}$ ,  $H_m = 800 \text{ m}$ ,  $R = 6378 \text{ km}$  d'où :  $C_3 = D_0 - D_H = -10 \times 0.8/6378 = -1.25 \text{ m}$ .

### 8.2.4. Correction de courbure au niveau zéro : Passage de $D_0$ à $D_e$

Soit  $D_e$  la distance suivant l'ellipsoïde en l'assimilant en un arc de cercle de rayon  $R$ , on a :

$$D_e = R.\beta \quad (8.13)$$



**Fig. 8.1** Réduction de la distance suivant la pente

et :

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{D_0}{2R} \implies D_0 = 2R \sin \frac{\beta}{2} \quad (8.14)$$

d'où :

$$C_4 = D_e - D_0 = R.\beta - 2.R \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) = R.\beta - 2\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (8.15)$$

Comme  $\beta$  est petit, on peut écrire que :

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{\beta}{2} - \frac{1}{6} \frac{\beta^3}{2^3} = \frac{\beta}{2} - \frac{\beta^3}{48} + \dots$$

d'où :

$$C_4 = R(\beta - \beta + \frac{\beta^3}{24} + \dots) = \frac{R\beta^3}{24} = \frac{RD_e^3}{24R^3}$$

soit :

$$C_4 = \frac{D_e^3}{24R^2} \quad (8.16)$$

Dans (8.16), on peut remplacer  $D_e$  par  $D_0$  ce qui donne :

$$C_4 = D_e - D_0 = \frac{D_0^3}{24R^2} \quad (8.17)$$

Exemple numérique :  $D_0 = 10\text{ km} \implies C_4 = 0.0012\text{ m} = 1.2\text{ mm}$ .

### 8.2.5. Réduction de la distance au plan de la représentation plane

#### 8.2.5.1. Le module linéaire

**Définition 8.1** On appelle le module linéaire en un point donné pour une représentation plane, le rapport  $m$  tel que :

$$m = \frac{\text{distance plan}}{\text{distance ellipsoïde}} = \frac{D_r}{D_e} \quad (8.18)$$

#### 8.2.5.2. L'altération linéaire

**Définition 8.2** On appelle l'altération linéaire en un point donné pour une représentation plane, le coefficient  $\epsilon$  tel que :

$$\epsilon = m - 1 \quad (8.19)$$

### 8.2.6. Correction de la distance au passage au plan

On a :

$$C_5 = D_r - D_e \quad (8.20)$$

Soit :

$$C_5 = D_r - D_e = mD_e - D_e = (m - 1)D_e = \epsilon D_e \quad (8.21)$$

**Exemple :** On donne  $D_e = 10000\text{ m}$ ,  $\epsilon = +12\text{ cm/km}$ , alors  $C_5 = 12 \times 10 = 120\text{ cm} = 1.20\text{ m}$  et  $D_r = D_e + C_5 = 10000 + 1.20 = 10001.20\text{ m}$ .

### 8.3 Formule rigoureuse de passage de $D_P$ à $D_0$

Dans le triangle  $OAB$  (**Fig. 8.1**), on a :

$$D_P^2 = (R + H_A)^2 + (R + H_B)^2 - 2(R + H_A)(R + H_B)\cos\beta \quad (8.22)$$

D'où :

$$\cos\beta = \frac{(R + H_A)^2 + (R + H_B)^2 - D_P^2}{2(R + H_A)(R + H_B)} \quad (8.23)$$

Dans le triangle  $OA_0B_0$ , on a :

$$D_0^2 = R^2 + R^2 - 2R^2\cos\beta \quad (8.24)$$

et :

$$\cos\beta = \frac{2R^2 - D_0^2}{2R^2} \quad (8.25)$$

En écrivant que les équations (8.23) et (8.25) sont égales et en posant  $\Delta H = H_A - H_B$ , on obtient la formule rigoureuse :

$$D_0 = D_P \sqrt{\frac{1 - \frac{\Delta H^2}{D_P^2}}{\left(1 + \frac{H_A}{R}\right)\left(1 + \frac{H_B}{R}\right)}} \quad (8.26)$$

### 8.4 Exercices et Problèmes

**Exercice 8.1** On a mesuré une distance suivant la pente  $D_P = 20130.858\text{ m}$  entre deux points  $A$  et  $B$  avec  $H_A = 235.07\text{ m}$ ,  $H_B = 507.75\text{ m}$ , on prendra comme rayon terrestre  $R = 6378\text{ km}$ .

1. Calculer la distance suivant l'ellipsoïde :

- en utilisant les différentes corrections ;
- en utilisant la formule rigoureuse.

2. En prenant la valeur de la formule rigoureuse et sachant que le module linéaire  $m$  vaut 0.999850371, calculer la distance réduite au plan de la représentation plane utilisée.

**Exercice 8.2** Entre 2 points  $A$  ( $H_A = 128.26\text{ m}$ ) et  $B$  ( $H_B = 231.84\text{ m}$ ), la distance  $D_P$  suivant la pente est égale à 15 498.823 m. Soit  $D_0$  la distance corde au niveau de la surface de référence. L'angle de site observé en  $A$  en direction de  $B$  est  $i = 0.3523\text{ gr}$ .

1. Calculer la valeur de  $D_0$  en utilisant la formule rigoureuse.
2. Calculer  $D_0$  par les corrections.
3. En adoptant la moyenne des deux méthodes, calculer la distance  $D_e$  réduite à la surface de référence.
4. Le module linéaire de la représentation plane utilisée est de 0.999648744. Calculer alors la distance  $D_r$  réduite au plan de la représentation.

**Exercice 8.3** On a mesuré une distance suivant la pente entre les points  $A$  ( $H_A = 1319.79\text{ m}$ ) et  $B$  ( $H_B = 1025.34\text{ m}$ ) avec  $D_P = 16483.873\text{ m}$ .

1. Calculer la distance  $D_e$  distance réduite à l'ellipsoïde de référence par la formule rigoureuse, on prendra le rayon de la Terre  $R = 6378\text{ km}$ .
2. Calculer la distance  $D_r$  réduite à la représentation plane utilisée si l'altération linéaire de la zone est de  $-14\text{ cm/km}$ .



# Chapitre 9

## *Les Systèmes des Altitudes*

Le deuxième type de système géodésique est le référentiel vertical ou le datum vertical qui définit l'origine des altitudes des réseaux de nivellement. D'un pays à un autre, les altitudes sont définies autrement.

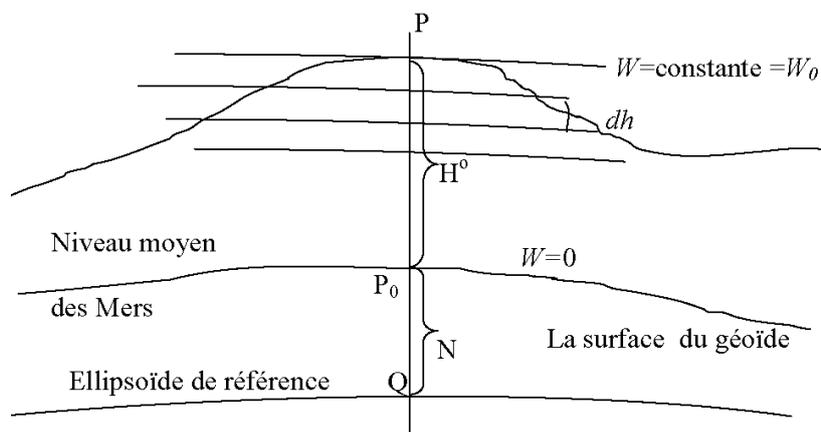
### 9.1 Les Systèmes d'Altitudes

Pour définir les altitudes, on utilise comme surface de référence, au lieu de l'ellipsoïde de référence géodésique, le géoïde (voir la définition 6.8). On rappelle la définition du géoïde comme suit :

*” Le géoïde correspond à la surface de niveau coïncidant avec le niveau moyen des mers prolongé sous les continents par la condition d’y rester normal à toutes les lignes de forces. ”*

Le géoïde est une surface équipotentielle  $W = Constante = W_0$  qu'on peut prendre égal à 0, soit  $W_0 = 0$ . Les surfaces de niveau n'étant pas parallèles et la différence de potentiel est indépendante du chemin suivi pour aller d'un point à un autre, alors on définit la cote géopotentielle au point  $P$  de la surface topographique par :

$$C(P) = \int_{P_0}^P dW = W(P) - W(P_0) = W(P) - W_0 = W(P) \quad (9.1)$$



**Fig. 9.1** Le géoïde

Or  $dW = g.dh$ , d'où :

$$C(P) = \int_{P_0}^P g dh \quad (9.2)$$

où  $g$  est la gravité mesurée et  $dh$  la dénivelée mesurée (**Fig.9.1**).

Cependant, l'unité de  $C(P)$  n'est pas une unité métrique, car une  $gpu = 1kgal.m = 100000 cm^2/s^2$ , alors pour exprimer l'altitude en unité métrique, on définit ci-après les altitudes suivantes.

### 13.1.1. L'Altitude Orthométrique

L'altitude orthométrique est définie par :

$$H^o = \frac{C(P)}{\langle g \rangle} = \frac{\int_{P_0}^P g dh}{\langle g \rangle} \quad (9.3)$$

où :

$$\langle g \rangle = \frac{1}{H} \int_{P_0}^P g dh = g' \quad (9.4)$$

est la moyenne de  $g$  du point  $P$  au point  $P_0$  sur le géoïde, cette valeur est inaccessible car sa connaissance nécessite une information sur la densité du sous sol. On remplace l'intégrale par une somme finie :

$$C(P) = \sum gdh = \sum (g - g' + g')dh = g' \sum dh + \sum (g - g')dh \quad (9.5)$$

D'où :

$$H^o = \frac{\sum gdh}{g'} = \frac{g' \sum dh}{g'} + \frac{\sum (g - g')dh}{g'} = \sum dh + \Delta H \quad (9.6)$$

$\sum dh$  est mesurée par le nivellement de précision et  $\Delta H$  est une correction orthométrique donnée par :

$$\boxed{\Delta H = -0.0053 \sin 2\varphi_m H_m \Delta\varphi} \quad (9.7)$$

avec  $\varphi_m$  la latitude moyenne entre le point de départ et du point d'arrivée,  $H_m$  l'altitude moyenne et  $\Delta\varphi$  la différence des latitudes des points de départ et d'arrivée.

### 13.1.2. L'Altitude Normale (ou de Molodensky)

Elle est donnée par :

$$\boxed{H^n = \frac{1}{\gamma_m} \int_{P_0}^P gdh = \frac{1}{\gamma_m} \sum gdh = \frac{1}{\gamma_m} \sum_i^n g_i dh_i} \quad (9.8)$$

avec :

$$\gamma_m = \frac{1}{H} \int_0^H \gamma dh \quad (9.9)$$

où  $\gamma_m$  est la pesanteur normale entre le géoïde et la surface équipotentielle du point considéré.  $\gamma_m$  est la pesanteur normale à l'ellipsoïde au point de latitude  $\varphi$ .  $\gamma_m$  est estimée par :

$$\gamma_m = \gamma_0 (1 - H/R) \quad (9.10)$$

avec  $\gamma_0$  la gravité théorique au niveau zéro et à la latitude  $\varphi$ , donnée par la formule de Cassini (en gal) :

$$\boxed{\gamma_0 = 978.0490(1 + 0.0052884 \sin^2 \varphi - 0.000059 \sin^2 2\varphi)} \quad (9.11)$$

### 13.1.3. L'Altitude Dynamique

Elle est donnée par :

$$H^d = \frac{1}{\gamma_{0,45}} \int_{P_0}^P g dh = \frac{1}{\gamma_{0,45}} \sum_i^n g_i dh_i \quad (9.12)$$

avec :

$\gamma_{0,45}$  = la valeur de la gravité normale à l'altitude zéro et à la latitude  $45^\circ$ .

### 13.1.4. L'Altitude GPS

Le GPS fournit une altitude ellipsoïdique géométrique  $h^{GPS}$ . Celle-ci est en relation avec l'altitude orthométrique  $H^o$  et l'ondulation du géoïde ou hauteur du géoïde  $N$  par rapport à l'ellipsoïde du GPS, par l'équation :

$$h^{GPS} = H^o + N \quad (9.13)$$

# Chapitre 10

## *La Géodésie Tunisienne*

'Geodesists are amongst the men of science those that operate all over the World, regardless of boundaries, differences in race, religion, ideology.'

( Antonio Marussi<sup>1</sup>, 1974)

### 10.1 Introduction

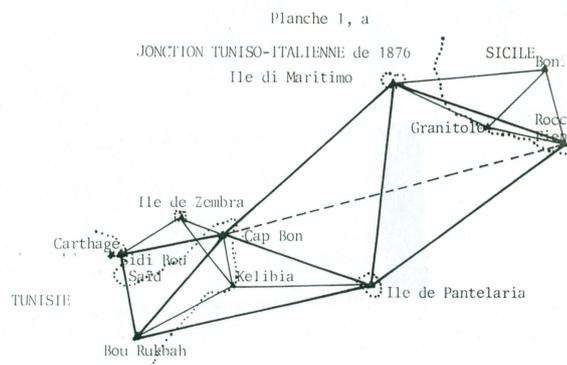
L'un des éléments fondamentaux de l'infrastructure d'un pays est son réseau géodésique.

A ce sujet, la Tunisie a connu le début de la création de son premier réseau géodésique à partir des observations géodésiques de la liaison entre le Cap-Bon et l'île de Sicile en 1876 (**Fig. 10.1**).

Sur ce réseau vont être rattachés tous les travaux cartographiques et topographiques et particulièrement ceux de l'Immatriculation Foncière Facultative (IFF) et du Cadastre.

---

1. Antonio Marussi (1908-1984) : géodésien et géophysicien italien.



**Fig. 10.1** Jonction Tuniso-Italienne de 1876 (*C. Fezzani, 1979*)

Cent ans après le début des observations du premier réseau géodésique en Tunisie, il s'était avéré la nécessité de revaloriser et moderniser ce réseau géodésique afin de satisfaire les besoins cartographiques et topographiques du pays avec le développement des appareils de mesures.

Ainsi, à partir de 1978, l'Office de la Topographie et de la Cartographie (OTC) a décidé de mener une campagne astro-géodésique qui va durer jusqu'à 1983.

Le nouveau réseau géodésique obtenu fait apparaître un décalage entre 0 à 10 mètres avec l'ancien réseau (Carthage34). L'adoption du nouveau réseau géodésique n'a pas été faite.

Avec le développement du positionnement géodésique avec les satellites GPS dans le système de référence mondial *WGS84* (World Geodetic System 84), un nouveau réseau de référence à vocation spatiale vient d'être observé en Tunisie en 1998. Les réseaux géodésiques classiques Tunisiens peuvent-ils répondre à la technologie GPS ? et de quelles manières ?

L'objet de ce chapitre est de décrire l'évolution des systèmes géodésiques terrestres tunisiens vers leur unification ainsi que l'adoption d'une nouvelle représentation plane adéquate pour toute la Tunisie.

Dans la suite, on s'intéresse aux réseaux géodésiques planimétriques.

## 10.2 Historique

Les premiers points géodésiques ont été créés en 1876 par les géodésiens italiens lors de la liaison entre le Cap-Bon et l'île de Sicile (**Fig. ??**). Le premier réseau géodésique tunisien a été défini à partir de l'extension du réseau Algérien, par l'observation du point astronomique Carthage en 1878 et la mesure de l'azimut astronomique de la direction Carthage - Bir Bou Regba pour l'orientation du réseau (*C. Fezzani, 1979*).

Avant 1978, la structure géodésique tunisienne était comme suit (**Fig. 10.2**) :

- un réseau géodésique dit du 1er ordre formé par le parallèle de Tunis au nord et le parallèle de Gabès au sud reliés par la méridienne dite de Gabès, les longueurs des côtés varient de 30 à 50 *kms* ;
- un réseau géodésique du 1er ordre complémentaire ;
- un réseau géodésique du 2ème ordre ;
- un réseau géodésique du 2ème ordre complémentaire ;
- les réseaux géodésiques de détail du 3ème et 4ème ordre ;
- un canevas de points astronomiques au sud (Sahara).

A un réseau de points géodésiques est associé le système géodésique c'est-à-dire les éléments de référence à partir desquels sont calculées les coordonnées géographiques ( latitude, longitude ) ou les coordonnées planimétriques ( $X, Y$ ). On donne ci-dessous les systèmes les plus utilisés en Tunisie.

## 10.3 Les Systèmes Géodésiques en Tunisie

### *14.3.1. Le Système Géodésique 'Voirol'*

C'était le premier système en Tunisie caractérisé par :

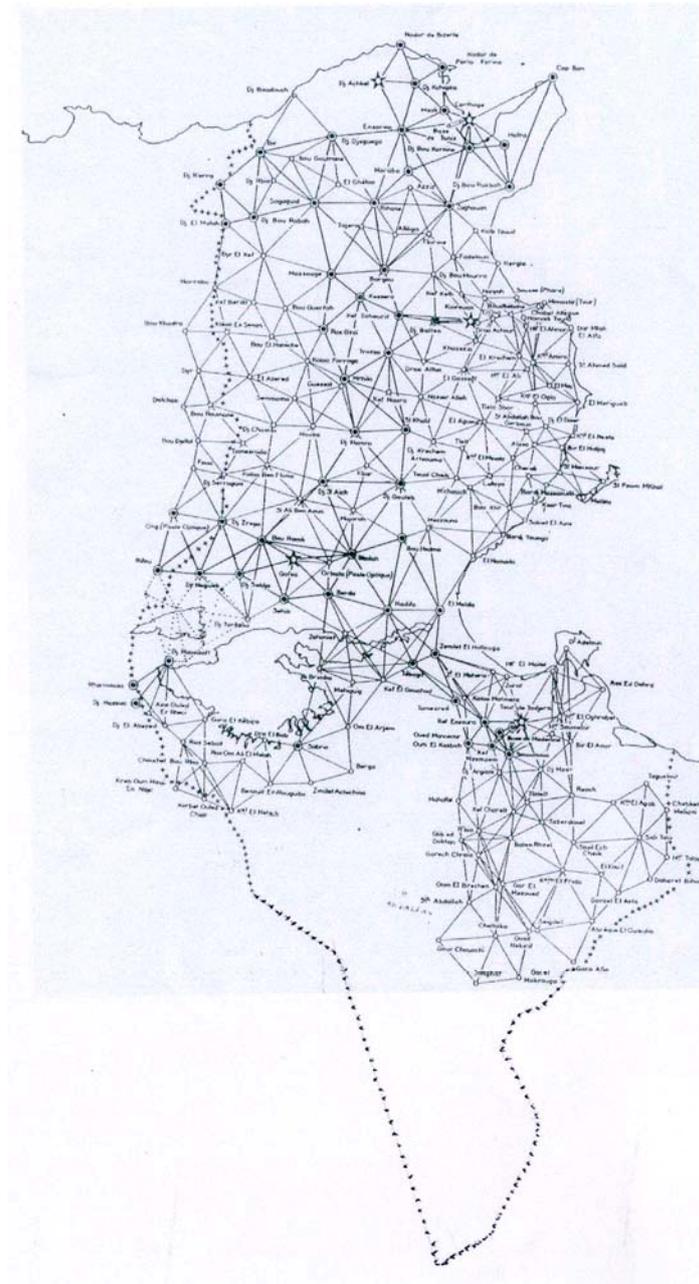


Fig. 10.2 La structure des réseaux géodésiques avant 1978

- le point fondamental (point de départ) : Voirol près d'Alger créé en 1875 ;
- la surface de référence c'est-à-dire le modèle choisi pour la Terre est l'ellipsoïde de Clarke Français 1880 ;
- l'orientation de départ est l'azimut astronomique de la direction Voirol-Meleb El Kora mesuré en 1874 ;
- la mise à l'échelle ou la qualité métrique de réseau : la mesure d'une distance ou base à Blida en Algérie mesurée en 1854.

Une grande partie du premier réseau géodésique terrestre tunisien était calculé dans ce système.

#### **14.3.2. Le Système Géodésique 'Carthage34'**

A la suite de la détection d'une erreur dans la mise à l'échelle du système Voirol en 1910 et vu sa qualité, le Service Géographique de l'Armée Française (S.G.A.F) a établi un nouveau système géodésique indépendant du système Voirol. Les éléments de définition de ce système sont :

- le point fondamental : le point Carthage en Tunisie ;
- l'ellipsoïde de référence : l'ellipsoïde de Clarke Français 1880 ;
- l'azimut de l'orientation : l'azimut astronomique de la direction Carthage - Bir Bou Regba ;
- la mise à l'échelle : les bases de Tunis et de Medenine.

Les calculs des coordonnées des points géodésiques de la partie nord ont été achevés en 1934.

Bien que l'ellipsoïde de référence est le même, les deux systèmes géodésiques Voirol et Carthage34 ont des origines différentes ce qui explique les décalages en longitude et latitude géodésiques. Ainsi au point fondamental Carthage, par exemple, on a les différences suivantes :

$$\varphi_{Voirol} - \varphi_{Carthage} = 25.86 \text{ dmgr} \quad (10.1)$$

$$\lambda_{Voirol} - \lambda_{Carthage} = 36.19 \text{ dmgr} \quad (10.2)$$

qui se traduisent par un décalage moyen planimétrique de  $245\text{ m}$  en  $x(\text{Nord})$  et de  $280\text{ m}$  en  $y(\text{Ouest})$ .

## 10.4 Les Représentations Planes

A un système géodésique donné, on peut lui associer plusieurs types de représentations planes. On donne ci-dessous les représentations planes en usage en Tunisie.

### 14.4.1. La Représentation de Bonne

La représentation de Bonne<sup>2</sup> est une représentation équivalente (conserve les surfaces). Elle n'est plus en usage mais elle était utilisée pour le découpage cartographique des cartes aux échelles  $1/50\ 000$ ,  $1/100\ 000$  et  $1/200\ 000$  (version ancienne).

### 14.4.2. La Représentation des Fuseaux

Elle a été utilisée dans le système géodésique Voirol pour le besoin de la triangulation et reste en usage dans les travaux de l'immatriculation foncière facultative pour traiter certains anciens dossiers (C. Fezzani, 1979).

Dans cette représentation, la Tunisie était partagée en six fuseaux, d'une étendue chacun de  $0.5$  grades ( $gr$ ) en longitude, subdivisés chacun en onze quadrilatères curvilignes de  $0.5\text{ gr}$  de côté en latitude (**Fig. 10.3**). Cette représentation plane fut abandonnée en 1922 pour être remplacée par la représentation plane Lambert Tunisie.

Les formules des coordonnées Fuseaux ( $x(\text{Nord}), y(\text{Ouest})$ ) en un point de coordonnées  $(\varphi, \lambda)$ , avec  $(\varphi_0, \lambda_0)$  les coordonnées du centre du quadrilatère considéré, sont comme suit (A. Ben Hadj Salem, 2013) :

---

2. **Rigobert Bonne** (1727-1795) : ingénieur, mathématicien et cartographe français.

$$\boxed{\begin{aligned} y &= \frac{(\lambda - \lambda_0)'' \cos \varphi}{R} \\ x &= \frac{(\varphi - \varphi_0)''}{P} + \frac{Q}{P} y^2 \end{aligned}} \quad (10.3)$$

avec les coefficients :

$$\boxed{P = \frac{2 \times 10^6}{\pi \rho_0}, \quad Q = \frac{1}{2} \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi_0}{N_0} \cdot P, \quad R = \frac{2 \times 10^6}{\pi N_0}} \quad (10.4)$$

où  $(\varphi - \varphi_0)''$ ,  $(\lambda - \lambda_0)''$  sont exprimés en *dmgr*(") en comptant les longitudes positives à l'Ouest de Greenwich et  $N_0$ ,  $\rho_0$  les 2 rayons de courbure de l'ellipsoïde de Clarke Français 1880 pour  $\varphi = \varphi_0$ .

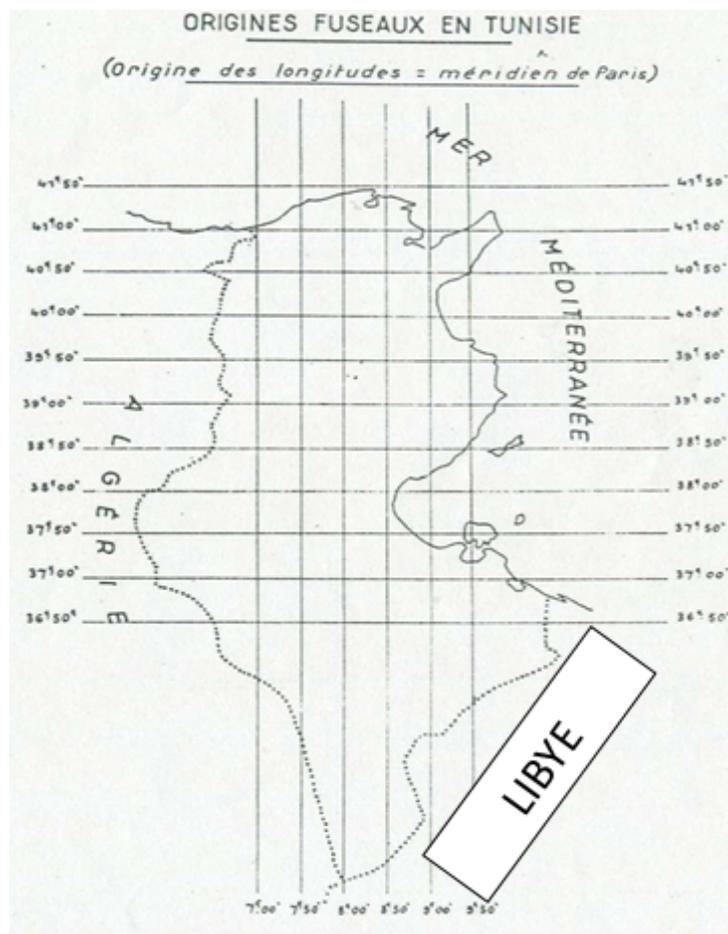


Fig. 10.3 Le découpage des fuseaux (C. Fezzani, 1979)

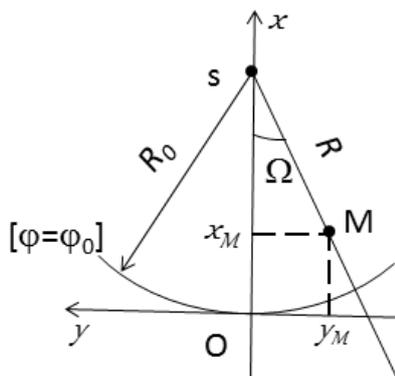
#### 14.4.3. La Représentation Lambert

C'est une représentation conforme (conserve les angles) d'un modèle ellipsoïdique. Afin d'éviter les déformations trop importantes, la représentation Lambert Nord Tunisie a été adoptée pour la partie Nord du pays (latitude comprise entre  $37.5\text{ gr}$  et  $42.5\text{ gr}$ ) et la représentation Lambert Sud Tunisie a été adoptée pour la partie sud (latitude comprise entre  $34.5\text{ gr}$  et  $39.5\text{ gr}$ ). La représentation Lambert Tunisie est nommée à l'OTC sous l'appellation "Origine Unique".

Pour la Tunisie, on considèrerait un système d'axes  $(O, x, y)$  tel que l'axe  $Oy$  est la tangente à l'image du parallèle origine  $\varphi_0$  au point  $O$  dirigé vers l'Ouest et  $Ox$  est porté par l'image du méridien origine dirigé vers le Nord (**Fig. 10.4**), dit repère STT<sup>3</sup>. Soit le point  $S$  de  $Ox$  avec  $OS = R_0$ , on a alors les coordonnées planes  $(x, y)$  :

$$\begin{aligned}x_M &= R_0 - R \cos \Omega \\y_M &= -R \sin \Omega\end{aligned}$$

avec  $\lambda$  comptée positivement à l'Est du méridien origine des longitudes.



**Fig. 10.4** Le repère STT

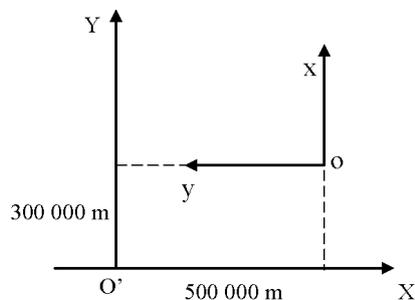
Avec l'introduction du facteur de réduction de l'échelle, les formules des coordonnées rectangulaires  $(x, y)$  deviennent :

$$\begin{aligned}x_M &= k(R_0 - R \cos((\lambda - \lambda_0) \sin \varphi_0)) \\y_M &= -kR \sin((\lambda - \lambda_0) \sin \varphi_0)\end{aligned} \tag{10.5}$$

avec  $\Omega = (\lambda - \lambda_0) \sin \varphi_0$

Pour obtenir des coordonnées rectangulaires positives, on définit pour la Tunisie un repère  $(O', X, Y)$  tel que  $O'X$  et  $O'Y$  soient dirigés respectivement vers l'Est et le Nord (**Fig. 10.5**).

3. STT : Service Topographique Tunisien, premier service tunisien chargé des travaux topographiques et foncières fut créé le 1<sup>er</sup> février 1882, deviendra plus tard l'OTC.



**Fig. 10.5** Le repère  $(O', X, Y)$

Dans le nouveau repère  $(O', X, Y)$ , on a donc :

$$\begin{cases} X = 500\,000.00\,m - y \\ Y = 300\,000.00\,m + x \end{cases} \quad (10.6)$$

Les quantités  $500\,000.00\,m$  et  $300\,000.00\,m$  sont respectivement les constantes de translation en  $X$  (*Est*) et en  $Y$  (*Nord*).

Due à l'importance de l'altération linéaire, la Tunisie est partagée en deux zones avec les caractéristiques suivantes :

Représentation Plane	Méridien origine	Parallèle origine	k
Lambert Nord Tunisie	$\lambda_0 = 11\,gr$	$\varphi_0 = 40\,gr$	0.999625544
Lambert Sud Tunisie	$\lambda_0 = 11\,gr$	$\varphi_0 = 37\,gr$	0.999625769

**Tableau 10.1** Caractéristiques de la représentation Lambert Tunisie

avec une amplitude de  $\pm 2.5\,gr$  du parallèle origine.

#### ***14.4.4. La Représentation Plane U.T.M.***

C'est une représentation conforme. Le modèle terrestre est un ellipsoïde divisé en 60 fuseaux de 6° d'amplitude, chacun de 3° de longitude de part et d'autre du méridien central. Dans la représentation UTM, toute la Tunisie se trouve dans le fuseau 32 avec le méridien de longitude 9° à l'Est de Greenwich comme méridien central.

Cette représentation a été utilisée dans le système géodésique Europe50 (usage militaire) et dans les nouvelles cartes aux échelles 1/200 000 et 1/50 000 éditées par l'OTC.

### **10.5 Pourquoi Un Nouveau Système Géodésique ?**

Suite à la publication du décret-loi relatif à l'immatriculation foncière obligatoire en 1964 et à la promulgation du Code des droits réels en 1965 d'une part, et le début de la mission cartographique du Service Topographique Tunisien d'autre part, il était impératif de mettre en place les infrastructures nécessaires pour réaliser les travaux de cartographie et de topographie dans un nouveau système géodésique national basé sur une nouvelle géodésie.

A cet effet, un premier diagnostic a été effectué en 1969 sur l'état de la géodésie tunisienne (*A. Fontaine, 1969*).

L'analyse de l'état de ces réseaux a montré des insuffisances aux niveaux de la qualité de l'échelle et de l'orientation.

## 10.6 Les Travaux de Modernisation des Réseaux Géodésiques Tunisiens

Grâce à la prise de conscience à la Direction de la Topographie et de la Cartographie (DTC)<sup>4</sup> de l'importance des sciences géographiques et en particulier de l'aspect géodésique, un protocole d'accord a été conclu entre la DTC et l'Institut Géographique National de France (IGNF) en 1972.

Ce protocole concernait l'étude et l'analyse des calculs de compensation des réseaux géodésiques tunisiens du 1er et 2ème ordre. L'analyse de l'état de ces réseaux (*C. Fezzani, 1979*) a montré des insuffisances aux niveaux de la qualité de l'échelle (1/40 000 à 1/30 000) et de l'orientation (15 *dmgr* à 25 *dmgr*). De plus, de nombreux points géodésiques ont disparu et d'autres ont été détruits d'où la nécessité de reprendre des travaux géodésiques pour revaloriser les réseaux géodésiques tunisiens.

### 14.6.1. Les Travaux de la Revalorisation de la Géodésie Tunisienne

A partir de 1978, l'OTC a décidé des travaux pour moderniser les réseaux géodésiques tunisiens afin de satisfaire les besoins cartographiques et topographiques du pays en commençant par le réseau géodésique de base.

Ces travaux de revalorisation des réseaux géodésiques tunisiens ont pour objectifs :

- l'abolition définitive de l'utilisation des différents systèmes géodésiques terrestres de types " isolés et fuseaux " en usage depuis plus d'un siècle ;
- la création d'un référentiel géodésique terrestre unique pour la Tunisie ;
- la mise en place d'une nouvelle représentation plane qui convient le mieux pour la Tunisie à savoir l'UTM.

---

4. En 1970, le Service Topographique Tunisien (STT) devenait la Direction de la Topographie et de la Cartographie au Ministère des travaux publics.

Les travaux de revalorisation de la géodésie Tunisienne (*M. Charfi*, 1983) comprenaient :

- la réfection des anciens points du 1er ordre, du 1er ordre complémentaire, du 2ème ordre et du 2ème ordre complémentaire ;
- la construction de nouveaux points sur les sites des anciens points disparus ;
- la densification de l'ancien réseau par de nouveaux points ;
- les observations angulaires azimutales et zénithales ;
- la détermination de 8 points de Laplace ;
- la mesure des côtés de 8 triangles géodésiques ;
- la détermination de 5 points par la méthode Doppler ;
- la compensation des observations terrestres avec les données Doppler pour obtenir les nouvelles coordonnées du nouveau réseau.

Les observations des 8 points de Laplace et la mesure des côtés des 8 triangles géodésiques, les observations et le calcul des 5 stations Doppler ainsi que la compensation du réseau géodésique ont fait l'objet d'une convention signée entre l'OTC et l'IGNF en 1982, suite à un appel d'offres international.

Le nouveau réseau géodésique terrestre appelé Réseau Géodésique Primordial (RGP) est composé de 312 points comme suit :

- \* 143 points anciens ;
- \* 112 nouveaux points construits sur les sites des anciens points disparus ;
- \* 58 nouveaux points.

### ***14.6.2. La Compensation du Réseau Géodésique Primordial***

La compensation du RGP effectuée par l'IGNF comprenait les compensations planimétrique et altimétrique.

La compensation planimétrique de 1984 effectuée par l'IGNF a défini donc un nouveau système géodésique terrestre nommé OTC84. En comparant les coordonnées issues d'OTC84 et avec celles de Carthage34, on a trouvé que les coordonnées anciennes ont subi un déplacement sous la forme d'une rotation dans le sens des gisements dont le centre se trouve dans la région de J. Semmama et d'un angle de  $20\text{dmgr}$  (2/1000 de grade). Les déplacements planimétriques varient de 0 à  $10.70\text{m}$  en s'éloignant du centre de la rotation.

### ***14.6.3. Le Système Carthage86***

Faute d'adopter les calculs de 1984, l'OTC a effectué par ses propres moyens un calcul de compensation des nouvelles observations angulaires en fixant les coordonnées Carthage34 des points anciens existants et ce-ci en trois phases :

- la phase une : la zone du Nord ;
- la phase deux : la zone du Centre ;
- la phase trois : la zone du Sud.

Cette compensation a donné naissance au système géodésique terrestre Carthage86, ayant le même ellipsoïde Clarke Français 1880. Les coordonnées des points géodésiques obtenues dans ce système sont à  $0.80\text{m}$  près de celles de Carthage34. Il faut signaler que les observations astronomiques de 1980 n'ont pas été introduites dans la compensation ce qui montre que l'orientation de Carthage86 est similaire à celle de Carthage34.

### ***14.6.4. Les Résultats des Travaux de la Revalorisation de la Géodésie Tunisienne***

A l'issue des travaux de calculs en 1984, on a obtenu un nouveau système géodésique - dit système géodésique OTC84 - matérialisé par le nouveau réseau géodésique appelé le Réseau Primordial Terrestre Tunisien constitué de 312 points géodésiques (**Fig. 10.6**).

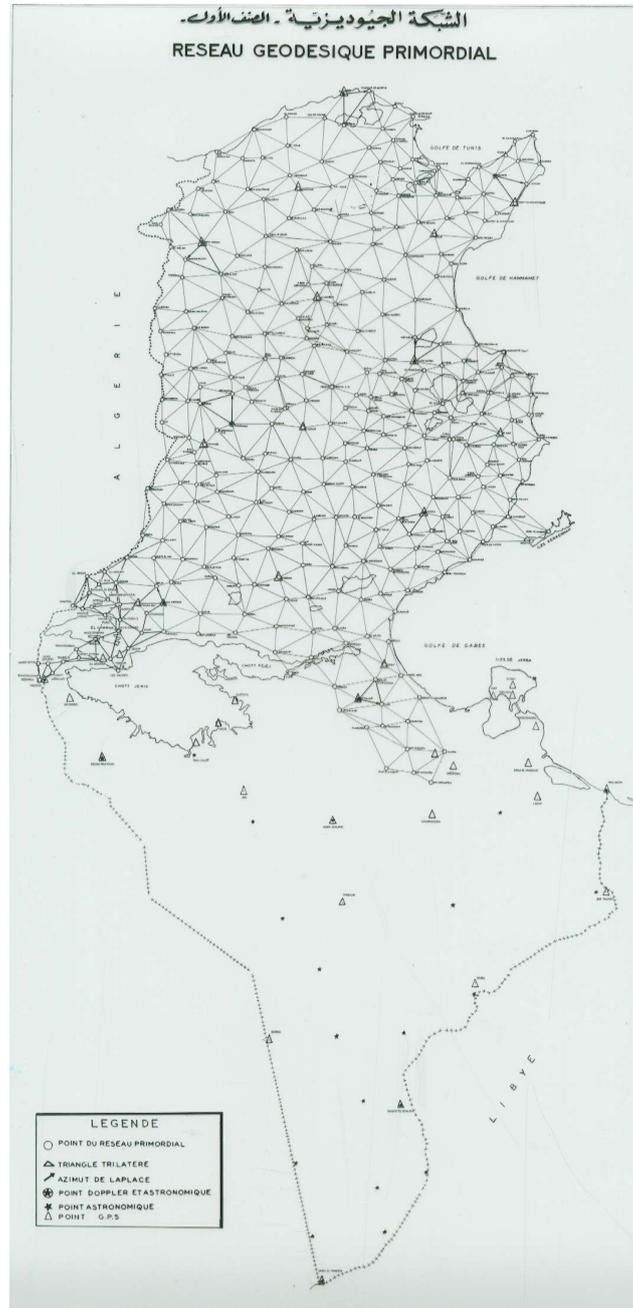


Fig. 10.6 Le Réseau Géodésique Primordial Tunisien

#### 14.6.4.1. Le Système Géodésique OTC84

Les caractéristiques du système sont :

- ellipsoïde de référence : ellipsoïde de Clarke 1880 Français ;
- les nouvelles observations angulaires + les anciennes observations angulaires pour les anciens points conservés (avant 1978) ;
- les observations de 8 points de Laplace (latitude, longitude et azimut astronomiques) et de 24 distances dans 8 triangles ;
- la fixation de 5 points anciens (observés par Doppler) avec un écart-type de 0.50 *m* ;
- une compensation globale par la méthode des moindres carrés (312 points).

**Le décalage entre OTC84 et Cathage34** : Il est sous la forme d'une rotation dont le centre est situé dans la région de Kasserine, et d'un angle de 25 *dmgr* dans le sens des gisements.

Ce phénomène a été observé dans la plupart des pays qui ont changé de système géodésique. Voici ci-dessous un exemple de la Suisse où on montre les décalages entre le système ancien (LV03) et le nouveau (LV95). (*Publication de l'Académie Bavaroise de Géodésie, 1997*)

Le décalage entre OTC84 et Carthage34 a été jugé inacceptable pour le patrimoine national en matière de cadastre.

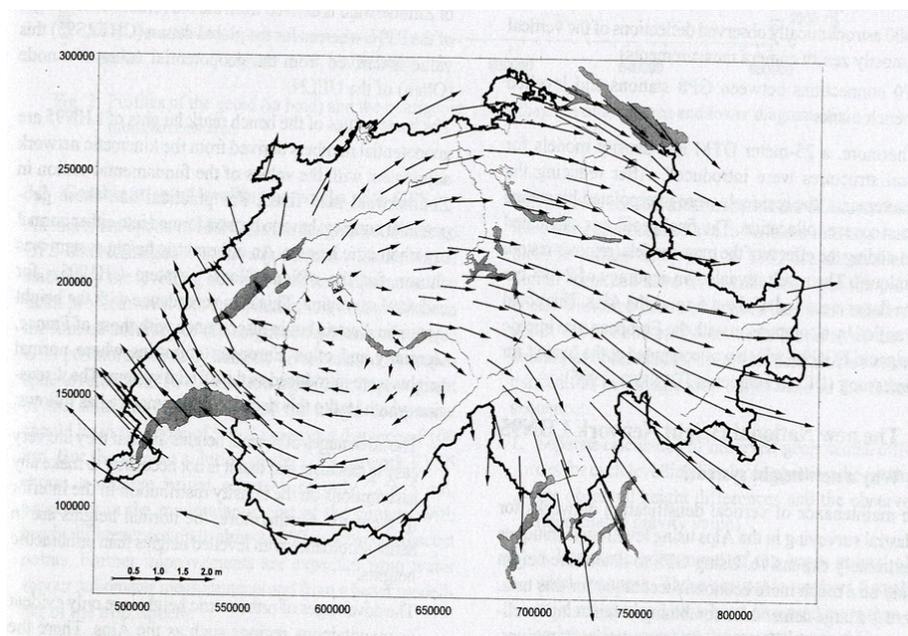
Résultat : Ce nouveau système géodésique n'a pas été appliqué.

D'où l'idée de la reprise des calculs des observations.

### 10.7 La Mise à niveau de la Géodésie Tunisienne

En 2001, l'OTC a entrepris un programme de mise à niveau de la géodésie Tunisienne (*A. Ben Hadj Salem, 1999*).

Cette mise à niveau comprenait :



**Fig. 10.7** les décalages entre le système ancien (LV03) et le nouveau (LV95)

- 1. l'unification des systèmes géodésiques terrestres ;
- 2. la création d'un réseau géodésique de base à référence spatiale ;
- 3. la détermination d'un géoïde précis pour la Tunisie ;
- 4. la mise en place d'une nouvelle représentation cartographique pour la Tunisie.

L'objectif de cette mise à niveau est :

\* d'unifier les différents systèmes en un seul référentiel géodésique terrestre homogène et précis, qui permettra d'une part la densification du réseau et l'exploitation des nouvelles techniques spatiales de positionnement dans les meilleures conditions et d'autre part de lever et de rétablir les limites bornées sans se référer obligatoirement aux titres riverains.

Les impératifs de la mise à niveau étant :

- la non altération des formes et des surfaces des parcelles ;

- la préservation des orientations des directions dans la limite des tolérances requises.

Une commission technique a été créée en décembre 2001 pour la mise en oeuvre de cette mise à niveau.

La réalisation de cette mise à niveau a commencé par l'établissement du Réseau Géodésique GPS Tunisien d'Ordre Zéro constitué de 28 points répartis sur tout le territoire (**Fig. 10.8**).

A partir de ce réseau, la désorientation du système Carthage34 a été vérifiée.

Disposant d'un logiciel de calculs géodésiques, la commission a procédé à un nouveau calcul des observations.

#### ***14.7.1. Comparaisons des coordonnées des système Carthage34 et OTC84***

La comparaison des coordonnées Lambert Nord Tunisie de 48 points dans les deux systèmes a permis de modéliser le décalage entre le système Carthage34 et le nouveau calcul par une transformation mathématique conforme du type :

$$Z - z_0 = (z - z_0) \cdot e^{it} \quad (10.7)$$

avec :

- "  $z_0$  " le centre de la rotation : point fictif près du point géodésique Gassaat Ej Jahfa, situé dans la région de Kasserine ;
- "  $t$  " l'angle de rotation = -27 *dmgr*.

#### ***14.7.2. Les Conclusions de la Commission Technique***

Après études et tests des coordonnées issues du nouveau calcul, la Commission technique a abouti aux résultats suivants :

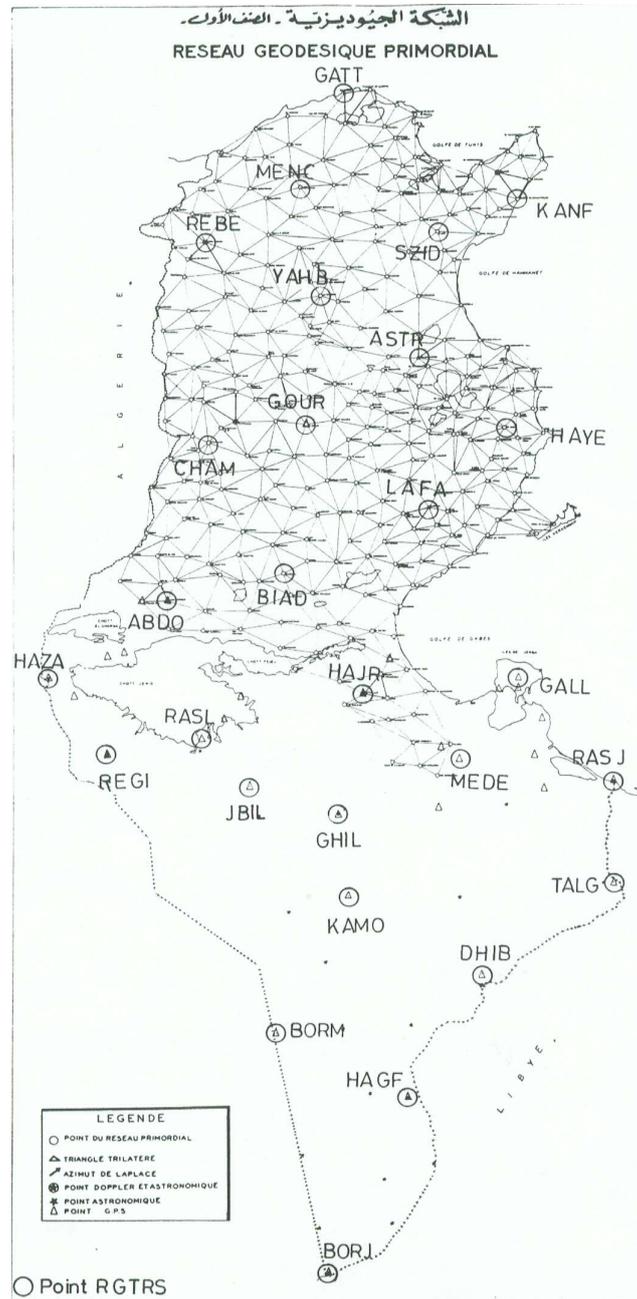


Fig. 10.8 Le Réseau GPS Tunisien de Référence Spatiale (RGTRS)

- le système OTC84 laisse invariant les formes, les directions et les surfaces dans les tolérances requises ;
- l'homogénéité de ce système géodésique offre :
  - \* un meilleur passage au système spatial *WGS84* ;
  - \* une parfaite intégration des futurs travaux géodésiques et topométriques dans le référentiel spatial.

La Commission technique a proposé d'adopter le système OTC84 le nouveau système géodésique terrestre tunisien appelé **NTT** (**N**ouvelle **T**riangulation **T**unisienne).

### 10.8 L'Arrêté du 10 Février 2009

L'arrêté du ministre de la Défense nationale du 10 février 2009, paru dans le Journal Officiel de la République Tunisienne n<sup>o</sup> 14 du 17 février 2009, fixe :

1. le système national de référence unifié de la géodésie ;
2. le système national de référence de la représentation cartographique ;
3. le système national de référence du nivellement.

#### ***14.8.1. Le Système National de Référence Unifié de la Géodésie***

Il est défini par :

- le système national géodésique des coordonnées géographiques appelé - la Nouvelle Triangulation Tunisienne - (NTT) ;
- l'ellipsoïde associé : c'est l'ellipsoïde de Clarke 1880 Français ( $a = 6378249.20$  m,  $b = 6356515.00$  m).

### ***14.8.2. Le Système National de Référence de la Représentation Cartographique***

Le système national actuel de référence de la représentation cartographique est défini par la représentation plane Universal Transverse Mercator (UTM), fuseau 32 Nord.

Les caractéristiques de la représentation UTM :

**Définition :** C'est une représentation :

- conforme c'est-à-dire conserve les angles ;
- cylindrique ==> on utilise les coordonnées rectangulaires  $(X, Y)$  ;
- transverse ==>  $X = X(\varphi, \lambda)$  et  $Y = Y(\varphi, \lambda)$

d'un modèle ellipsoïdique.

\* Les éléments de définition sont :

- l'ellipsoïde de référence est celui de Clarke Français 1880 ;
- le méridien origine :  $9^{\circ} \frac{1}{2}$  à l'Est de Greenwich ou fuseau  $n^{\circ} \frac{1}{2} 32$  ;
- le facteur d'échelle :  $k = 0.9996$  ;
- la constante en  $X$  :  $500\,000.00\,m$  ;
- la constante en  $Y$  :  $0.00\,m$ .

### ***14.8.3. Le Système National de Référence du Nivellement***

On utilise le système des altitudes orthométriques. Le point fondamental ou référence des altitude est le repère scellé sur le monument Porte de France à Tunis avec une altitude de  $7.000\,m$  au dessus du niveau moyen de la mer (Nouvelle compensation du Réseau de Nivellement Général de la Tunisie - 1961). Cette référence a été déterminée à partir de mesures du niveau moyen de la mer faites au marégraphe de la Goulette. Le système d'altitudes est appelé le Nivellement Général de la Tunisie (NGT).

Le Nivellement Général de la Tunisie comprend :

- \* un réseau de nivellement de précision du 1er ordre ;
- \* un réseau de nivellement de précision du 2ème ordre ;
- \* un réseau de nivellement de précision du 3ème ordre.

## 10.9 Conclusions

L'arrêté du 10 février 2009 a défini les fondements de la géomatique en Tunisie, car un pays sans les définitions précises de ses référentiels de géodésie, de nivellement et de cartographie ne peut avancer en la matière.

L'unification des systèmes géodésiques terrestres va permettre :

- d'abolir l'utilisation des systèmes isolés ;
- le développement des bases de données et les systèmes d'informations géographiques sur l'ensemble du pays ;
- d'assainir le système foncier tunisien sur des bases solides ;
- de développer en harmonie l'application des technologies actuelles de positionnement spatial et celles du futur.

# Chapitre 11

## *Les Représentations Planes*

### 11.1 Introduction

On a vu dans les chapitres précédents qu'un point géodésique est représenté par ses coordonnées géodésiques  $(\varphi, \lambda, h_e)$  dans un système géodésique donné relatif à un ellipsoïde donné.

Les calculs géodésiques sur l'ellipsoïde étant compliqués d'une part et que l'homme a cherché toujours à visualiser le monde extérieur où il vit par des graphiques et des plans représentés sur des surfaces planes d'autre part.

Le géodésien, par le moyen des représentations planes appelées incorrectement projections, donne une représentation du modèle terrestre (sphère ou ellipsoïde) sur le plan où il est plus facile d'effectuer les calculs d'angles, de distances et de gisements.

Cependant, ces représentations subissent des déformations dues aux propriétés géométriques des surfaces modèles et images. Le problème fondamental ici est de définir des représentations minimisant ces déformations compte tenu d'un objectif déterminé.

Dans la suite du cours, on étudie les représentations dites conformes en général et plus en détail : la représentation conique Lambert et la représentation UTM (Universal Transverse Mercator).

On va établir une correspondance entre les points d'une surface modèle  $\sigma$  et les points d'une surface image  $\Sigma$ , dans le cas particulier où :

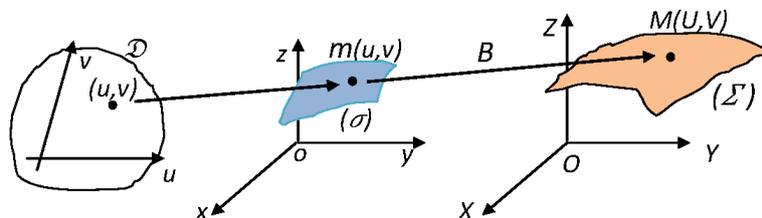
- la surface  $\sigma$  est sphérique ou ellipsoïdique ;
- la surface  $\Sigma$  est plane.

## 11.2 Eléments correspondants

Représenter la surface  $\sigma$  sur  $\Sigma$  consiste à définir une bijection  $B$  de  $\sigma \Rightarrow \Sigma$  (**Fig. 11.1**) :

à  $m(u,v) \in (\sigma) \Rightarrow M(U,V) \in (\Sigma)$  avec :

$(u,v) \in \mathcal{D} \subset \mathbb{R}^2$ ,  $U = U(u,v)$ ,  $V = V(u,v)$  et  $OM = B(om)$

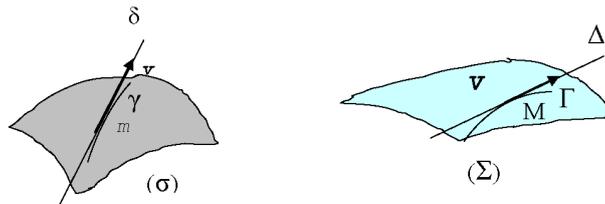


**Fig. 11.1** Représentation plane

$(u,v)$  les paramètres qui définissent la surface  $(\sigma)$  et  $U,V$  sont ceux de la surface  $(\Sigma)$ .

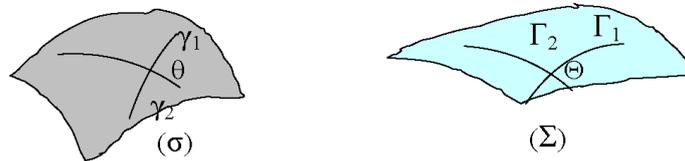
Les points  $m(u,v)$  et  $M(U,V)$  sont appelés points correspondants. Si le point  $m$  décrit une courbe  $(\gamma)$  sur  $(\sigma)$ , son image  $M$  décrit une courbe  $(\Gamma)$ , on dit que les courbes  $(\gamma)$  et  $(\Gamma)$  sont dites courbes correspondantes.

De même, on appelle tangentes correspondantes, les tangentes à deux courbes correspondantes en deux points correspondants (**Fig. 11.2**).



**Fig. 11.2** Tangentes correspondantes

L'angle de deux tangentes à deux courbes sur  $(\sigma)$  et l'angle des tangentes correspondantes sont dites angles correspondants (**Fig. 11.3**).



**Fig. 11.3** Angles correspondants

### 11.3 Canevas

Les représentations sont différenciées par deux aspects qui sont :

- la nature des courbes coordonnées du modèle et celles de l'image qui définissent le caractère du canevas;
- le type de l'altération : longueurs et/ou angles et/ou surfaces.

**Définition 11.1** On appelle *canevas* les images des courbes coordonnées du modèle.

Pour passer au plan, on peut considérer le passage du modèle ellipsoïdique au plan ou celui du modèle ellipsoïdique au plan via le modèle sphérique :

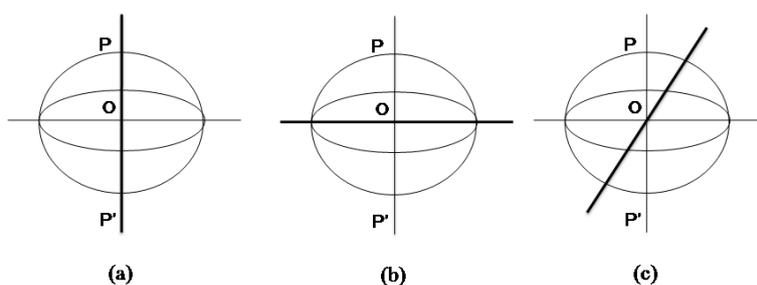
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{l'ellipsoïde} \implies \text{au plan} \\ \text{l'ellipsoïde} \implies \text{à la sphère} \implies \text{au plan} \end{array} \right.$$

Les représentations peuvent être classées selon la nature des courbes coordonnées  $(u, v)$  et  $(U, V)$ . Pour le modèle sphérique, les courbes coordonnées  $(u, v)$  déterminent toujours deux familles de courbes orthogonales, méridiens et parallèles ou pseudo-méridiens et pseudo-parallèles.

Soit  $DD'$  le diamètre de référence du modèle, le point  $D$  est le pivot de la représentation (**Fig. 11.4**).

La représentation est dite :

- directe, si le diamètre de référence est choisi sur la ligne des pôles  $PP'$  ;
- transverse si le diamètre de référence est perpendiculaire à  $PP'$  ;
- oblique : les autres cas, le pivot n'est ni pôles, ni sur l'équateur. Quant aux



**Fig. 11.4** Types de représentation

courbes coordonnées de l'image plane, elles sont :

- soit deux familles de droites perpendiculaires ;  $U, V$  sont alors les coordonnées cartésiennes  $X$  et  $Y$  du plan ;

- soit une famille de droites concourantes ( $\Omega$ ) et la famille de cercles orthogonaux ( $R$ ) définissant des coordonnées polaires.

## 11.4 Les Représentations Cylindriques

Les représentations cylindriques sont définies par les représentations ayant comme courbes coordonnées images les coordonnées cartésiennes  $X, Y$  correspondantes aux courbes coordonnées du modèle.

Leurs équations sont pour les représentations cylindriques quelconques :

$$\begin{aligned} X = X(u) &\iff u = u(X) \\ Y = Y(v) &\iff v = v(Y) \end{aligned} \quad (11.1)$$

Cas des représentations cylindriques directes : les paramètres du modèle sont  $\varphi, \lambda$  respectivement la latitude et la longitude et les équations de la représentations sont de la forme :

$$\begin{aligned} X = X(\varphi) &\iff \varphi = \varphi(X) & \text{ou} & & X = X(\lambda) &\iff \lambda = \lambda(X) \\ Y = Y(\lambda) &\iff \lambda = \lambda(Y) & & & Y = Y(\varphi) &\iff \varphi = \varphi(Y) \end{aligned} \quad (11.2)$$

Cas des représentations cylindriques transverses : les paramètres du modèle sont les coordonnées de Cassini-Soldner ( $L, H$ ) et les équations sont de la forme :

$$\begin{aligned} X = X(L) &\iff L = L(X) & \text{ou} & & Y = Y(L) &\iff L = L(Y) \\ Y = Y(H) &\iff H = H(Y) & & & X = X(H) &\iff H = H(X) \end{aligned} \quad (11.3)$$

En remplaçant  $L$  et  $H$  en fonction de  $\varphi$  et de  $\lambda$ , on obtient :

$$\begin{aligned} X = X(\varphi, \lambda) &\iff \varphi = \varphi(X, Y) \\ Y = Y(\varphi, \lambda) &\iff \lambda = \lambda(X, Y) \end{aligned} \quad (11.4)$$

## 11.5 Les Représentations Coniques et Azimutales

Ce sont les représentations planes telles que les courbes coordonnées images sont définies par les coordonnées polaires  $R, \Omega$ . Les courbes  $R = \text{Constante}$  et  $\Omega = \text{constante}$  sont les courbes correspondantes des courbes coordonnées  $u$  et

$v$  du modèle.

Les équations générales de ces représentations sont de la forme :

$$\begin{aligned} \Omega = \Omega(u) &\iff u = u(\Omega) \\ R = R(v) &\iff v = v(R) \end{aligned} \quad (11.5)$$

$u = \text{cte} \implies \Omega = \text{cte} \implies$  les images de  $u = \text{cte}$  sont des droites concourantes.

$v = \text{cte} \implies R = \text{cte} \implies$  les images de  $v = \text{cte}$  sont des arcs de cercles concentriques.

Parmi les représentations coniques, on trouve un groupe particulier de représentations où l'angle  $\Omega$  est égal à l'angle du cercle méridien correspondant soit l'azimut de la tangente au méridien au pôle  $D$  de la représentation, ces représentations sont dites **représentations azimutales** :

$$\begin{aligned} \Omega = Az &\iff Az = \Omega \\ R = R(v) &\iff v = v(R) \end{aligned} \quad (11.6)$$

Les représentations **coniques directes** ont leurs équations comme suit :

$$\begin{aligned} R = R(\varphi) &\iff \varphi = \varphi(R) \\ \Omega = \Omega(\lambda) &\iff \lambda = \lambda(\Omega) \end{aligned} \quad (11.7)$$

## 11.6 Les Altérations

### 9.6.1. L'Altération Angulaire

**Définition 11.2** On appelle altération angulaire la différence des deux angles correspondants soit :

$$\boxed{\Theta - \theta} \quad (11.8)$$

### 9.6.2. Le Module Linéaire dans une direction $\delta$

Soit  $\delta$  la direction de la tangente en un point donné  $m$  du modèle  $(\sigma)$ ,  $s$  et  $S$  les abscisses curvilignes sur les 2 courbes correspondantes  $(\gamma)$  et  $(\Gamma)$ .

**Définition 11.3** On appelle module linéaire dans la direction  $\delta$  le rapport :

$$m_\delta(u, v) = \frac{dS}{ds} = \frac{\|\mathbf{dM}(U, V)\|}{\|\mathbf{dm}(u, v)\|} = \frac{\|\mathbf{V}\|}{\|\mathbf{v}\|} \quad (11.9)$$

où  $\mathbf{V}$  est l'image du vecteur  $\mathbf{v}$  unitaire dans la direction  $\delta$ .

En utilisant les éléments de la 1ère forme fondamentale des surfaces  $(\sigma)$  et  $(\Omega)$ , on a alors :

$$m_\delta^2 = \left(\frac{dS}{ds}\right)^2 = \frac{dS^2}{ds^2} = \frac{EdU^2 + 2FdUdV + GdV^2}{edu^2 + 2fdudv + gdv^2}$$

soit :

$$m_\delta = \sqrt{\frac{EdU^2 + 2FdUdV + GdV^2}{edu^2 + 2fdudv + gdv^2}} \quad (11.10)$$

### 9.6.3. L'Altération Linéaire

**Définition 11.4** On appelle altération linéaire dans la direction  $\delta$  la quantité sans unité :

$$\epsilon = m_\delta - 1 \quad (11.11)$$

### 9.6.4. Le Module aréolaire

Soient  $da(\sigma)$  et  $dA(\Sigma)$  des aires de domaines limités par des contours correspondants, alors :

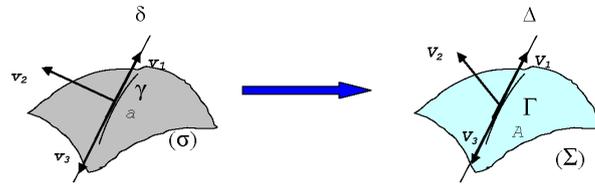
**Définition 11.5** Le module aréolaire ou rapport des aires est donné par :

$$m_a = \frac{dA(\Sigma)}{da(\sigma)} = \sqrt{\frac{EG - F^2}{eg - f^2}} \quad (11.12)$$

## 11.7 Indicatrice de Tissot

### 9.7.1. Le Lemme de Tissot<sup>1</sup>

**Lemme 11.1** *En 2 points correspondants, il existe au moins deux 2 vecteurs  $\mathbf{v}_1$  et  $\mathbf{v}_2$  orthogonaux sur  $(\sigma)$  admettant deux vecteurs  $\mathbf{V}_1$  et  $\mathbf{V}_2$  correspondants orthogonaux sur  $(\Sigma)$  (Fig. 11.5).*



**Fig. 11.5** Les directions principales

*Le couple de directions correspondantes orthogonales à la fois sur la surface image  $(\Sigma)$  et sur la surface modèle  $(\sigma)$  sont appelées directions principales (au sens de Tissot).*

Soient  $\delta_1$  et  $\delta_2$  les directions principales sur  $(\sigma)$ . Les modules linéaires dans les directions  $\delta_1$  et  $\delta_2$  sont dits modules principaux :

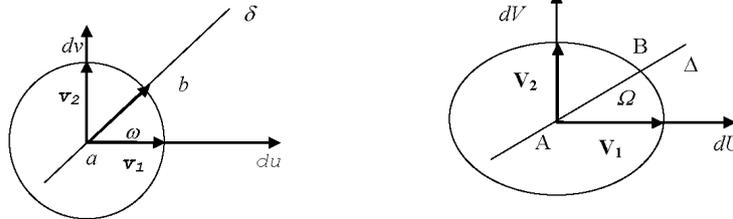
$$\begin{aligned} m_{\delta_1} &= m_1 \\ m_{\delta_2} &= m_2 \end{aligned}$$

**Indicatrice de Tissot :** Soient  $a$  un point de  $(\sigma)$ , dans le plan tangent à  $(\sigma)$  au point  $a$  et le repère orthonormé  $(a, du, dv)$  de vecteurs unitaires  $\mathbf{v}_1$  et  $\mathbf{v}_2$ . Soit  $b$  un point voisin de  $a$  tel que  $\|\mathbf{ab}\| = 1$ . Au repère  $(a, du, dv)$  correspond le repère orthonormé  $(A, dU, dV)$  sur la surface  $\Sigma$ , et au point  $b$  correspond le point  $B$  (Fig. 11.6).

Par définition, on a :

$$m_\delta = \frac{\|\mathbf{AB}\|}{\|\mathbf{ab}\|} = \|\mathbf{AB}\|$$

1. Nicolas Auguste Tissot (1824 - 1897) : cartographe français.



**Fig. 11.6** Indicatrice de Tissot

et :

$$m_1 = \frac{\|V_1\|}{\|v_1\|} = \|V_1\|$$

$$m_2 = \frac{\|V_2\|}{\|v_2\|} = \|V_2\|$$

Par les définitions des modules linéaires  $m_1$  et  $m_2$ , on peut écrire :

$$m_1 = \frac{\|AB\| \cos \Omega}{\|ab\| \cos \omega} = \frac{m_\delta \cos \Omega}{1 \cdot \cos \omega} \Rightarrow m_1 \cos \omega = m_\delta \cos \Omega$$

$$m_2 = \frac{\|AB\| \sin \Omega}{\|ab\| \sin \omega} = \frac{m_\delta \sin \Omega}{1 \cdot \sin \omega} \Rightarrow m_2 \sin \omega = m_\delta \sin \Omega$$
(11.13)

Les coordonnées du point  $B$  dans  $(A, dU, dV)$  sont donc :

$$dU = AB \cos \Omega = m_\delta \cdot \cos \Omega = m_1 \cdot \cos \omega$$

$$dV = AB \sin \Omega = m_\delta \cdot \sin \Omega = m_2 \cdot \sin \omega$$
(11.14)

**Théorème 11.1 (Indicatrice de Tissot)** Quand le point  $b$  varie c'est-à-dire  $\omega$  varie, le point  $B$  image de  $b$  décrit une ellipse d'équation :

$$\boxed{\frac{dU^2}{m_1^2} + \frac{dV^2}{m_2^2} = 1}$$
(11.15)

Cette ellipse est appelée *indicatrice de Tissot*.

Elle est l'image du cercle de rayon unité dans le plan tangent au point  $a$  de  $(\sigma)$ . Les longueurs des demis grands et petits axes sont les modules principaux  $m_1$

et  $m_2$ . La longueur d'un demi-diamètre est le module linéaire dans la direction  $\delta$  soit  $m_\delta$ .

Dans le cas général, il existe un seul couple de vecteurs orthogonaux correspondants.

**Corollaire 9.1** *S'il y'a une infinité de couples de vecteurs orthogonaux correspondants, l'indicatrice de Tissot est un cercle quelque soit la direction  $\delta$  et le module linéaire est indépendant de la direction :*

$$\boxed{m_\delta = m_1 = m_2 = m} \quad (11.16)$$

### 9.7.2. Altération Angulaire

L'altération angulaire est donnée par  $\Omega - \omega$ . Or d'après les coordonnées de B données par les équations (11.13), on a :

$$tg\Omega = \frac{m_2}{m_1} tg\omega$$

On calcule :

$$\frac{tg\Omega - tg\omega}{tg\Omega + tg\omega} = \frac{\left(\frac{m_2}{m_1} - 1\right) tg\omega}{\left(\frac{m_2}{m_1} + 1\right) tg\omega} = \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1}$$

Or :

$$\frac{tg\Omega - tg\omega}{tg\Omega + tg\omega} = \frac{\sin(\Omega - \omega)}{\sin(\Omega + \omega)} = \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1}$$

Si l'altération angulaire est nulle  $\implies \Omega - \omega = 0 \implies \Omega = \omega$ . D'où  $m_2 = m_1$  et l'indicatrice de Tissot est un cercle. Par suite, on a l'équivalence :

$$\boxed{\text{Altération angulaire nulle} \Leftrightarrow m_2 = m_1 \text{ et pour toute } \delta \ m_\delta = m = \text{cte}} \quad (11.17)$$

La représentation est dite dans ce cas **conforme**.

## 11.8 Les Représentations Planes et les Fonctions Analytiques

### 9.8.1. Rappels Mathématiques

On considère le plan complexe tel que à un point de coordonnées  $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ , on associe le nombre complexe  $z = x + iy \in \mathbb{C}$  et on peut écrire :

$$z = |z|e^{i.arg(z)} = |z|(\cos(arg(z)) + i\sin(arg(z))) \quad (11.18)$$

où  $|z|$  est le module et  $arg(z)$  est l'argument du nombre complexe  $z$  défini à  $2k\pi$  avec :

$$\begin{aligned} |z| &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ tg(arg(z)) &= \frac{y}{x}, \quad x \neq 0 \end{aligned} \quad (11.19)$$

#### 9.8.1.1. Logarithme Complexe

Soit  $t$  un nombre complexe donné, on cherche tous les nombres complexes  $z$  tels que  $e^z = t$ . Il n'en existe que si  $t \neq 0$ . Supposons  $t \neq 0$ , on a alors :

$$z = x + iy \implies e^z = t \implies e^x e^{iy} = t = |t|e^{i.arg(t)} \Rightarrow x = \text{Log}|t| \text{ et } y = arg(t) \text{ à } 2k\pi \text{ près}$$

On a donc :

$$z = x + iy = \text{Log}|t| + i.arg(t)$$

Par définition, on pose :

$$\boxed{z = \text{Log}t = \text{Log}|t| + i.arg(t)} \quad (11.20)$$

**Définition 11.6** On appelle détermination de  $\text{Log}t$  dans un ouvert connexe  $\mathcal{D}$  du plan complexe toute fonction  $g$  continue de  $t$  définie dans  $\mathcal{D}$  et telle que :

$$\boxed{\forall t \in \mathcal{D}, e^{g(t)} = t} \quad (11.21)$$

### 9.8.2. Fonction analytique

A tout nombre complexe  $z = x + iy$  on peut lui faire correspondre un nombre complexe  $Z = X + iY$  par l'intermédiaire d'une fonction  $f$ . On note, en appelant  $P$  et  $Q$  les parties réelle et imaginaire de  $f$  :

$$Z = f(z) = P(x, y) + iQ(x, y) \quad (11.22)$$

Cette correspondance entre  $z$  et  $Z$  définit une représentation d'un plan ( $p$ ) sur un plan ( $P$ ) dans laquelle le point  $A$  d'affixe  $Z$  du plan ( $P$ ) est l'image d'un point  $a$  d'affixe  $z$  du plan ( $p$ ). L'extension des propriétés concernant les limites

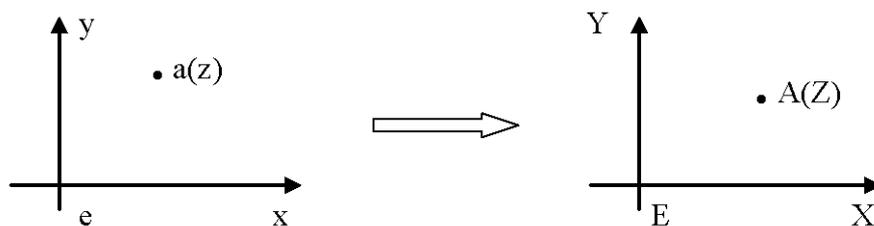


Fig. 11.7 Correspondance

et la continuité, pour la fonction  $f$ , se déduit immédiatement des propriétés analogues concernant les fonctions  $P$  et  $Q$  des deux variables  $(x, y)$ .

Pour étendre à la fonction  $f$  la notion de dérivée, il faut étudier la limite, lorsque  $z \rightarrow 0$ , du rapport  $\frac{dZ}{dz}$ , qui s'écrit :

$$\frac{dZ}{dz} = \frac{dX + i dY}{dx + i dy} = \frac{P'_x dx + P'_y dy + i(Q'_x dx + Q'_y dy)}{dx + i dy} = \frac{(P'_x + iQ'_x)dx + (P'_y + iQ'_y)dy}{dx + i dy}$$

Ce rapport dépend en général de  $\frac{dy}{dx}$ , sa limite dépend de la manière dont  $dz$  tend vers zéro, ou encore de la façon dont le point  $a'$  d'affixe  $z + dz$  tend vers le point  $a$  d'affixe  $z$  : si  $a'$  tend vers  $a$  en décrivant une spirale dont  $a$  est le point asymptotique, par exemple, la limite n'existe pas.

Mais le rapport  $\frac{dZ}{dz}$  est une fonction homographique de  $(dx, dy)$ . La limite quand  $dz \rightarrow 0$ , est indépendante de la façon dont  $dz \rightarrow 0$ , c'est-à-dire dont  $dx$  et  $dy$  tendent (indépendamment) vers 0, si :

$$P'_x + iQ'_x = \frac{P'_y + iQ'_y}{i} \quad (11.23)$$

C'est-à-dire si :

$$\boxed{P'_x = Q'_y \quad \text{et} \quad P'_y = -Q'_x} \quad (11.24)$$

ou en revenant à  $X$  et  $Y$  :

$$\boxed{\text{Conditions de Cauchy} \begin{cases} \frac{\partial X}{\partial x} = \frac{\partial Y}{\partial y} \\ \frac{\partial X}{\partial y} = -\frac{\partial Y}{\partial x} \end{cases}} \quad (11.25)$$

relations connues sous le nom de **conditions de Cauchy**<sup>2</sup>. Lorsque ces conditions sont satisfaites, la fonction  $f$  admet, en tout point de son domaine de définition, une dérivée notée :

$$\boxed{f'(z) = \frac{df}{dz} = \frac{dZ}{dz} = P'_x + iQ'_x = Q'_y - iP'_y} \quad (11.26)$$

La fonction  $f$  est dite **analytique**.

### 9.8.2.1. Autre définition de la fonction analytique

Soit  $F(x, y)$  une fonction complexe donc une application de  $\mathbb{R} \times \mathbb{R} \mapsto \mathbb{C}$ . On suppose que  $F$  soit différentiable entraîne que :

$$dF(x, y) = \frac{\partial F(x, y)}{\partial x} dx + \frac{\partial F(x, y)}{\partial y} dy \quad (11.27)$$

On pose :

$$z = x + iy$$

$$\bar{z} = x - iy$$

qui sont 2 fonctions différentiables en  $x$  et  $y$ , d'où :

$$dz = dx + idy$$

$$d\bar{z} = dx - idy$$

---

2. **Augustin-Louis Cauchy** (1789-1857) : mathématicien français.

Par suite :

$$dx = \frac{1}{2}(dz + d\bar{z}) \quad (11.28)$$

$$dy = \frac{1}{2i}(dz - d\bar{z}) \quad (11.29)$$

On les remplace dans l'équation (11.27), on obtient :

$$dF(x, y) = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial F(x, y)}{\partial x} - i \frac{\partial F(x, y)}{\partial y} \right) dz + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial F(x, y)}{\partial x} + i \frac{\partial F(x, y)}{\partial y} \right) d\bar{z}$$

En remplaçant  $x$  par  $(z + \bar{z})/2$  et  $y$  par  $(z - \bar{z})/2i$ ,  $F(x, y)$  devient une fonction  $G(z, \bar{z})$ , ce qui donne en posant :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial}{\partial x} - i \frac{\partial}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial}{\partial \bar{z}} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial}{\partial x} + i \frac{\partial}{\partial y} \right) \\ dF(x, y) = dG(z, \bar{z}) &= \frac{\partial G(z, \bar{z})}{\partial z} dz + \frac{\partial G(z, \bar{z})}{\partial \bar{z}} d\bar{z} \end{aligned} \quad (11.30)$$

On considère maintenant le cas où la fonction  $F$  est analytique. De l'équation précédente, on a :

$$dF(x, y) = dG(z, \bar{z}) = \frac{\partial G(z, \bar{z})}{\partial z} dz + \frac{\partial G(z, \bar{z})}{\partial \bar{z}} d\bar{z} = F'(z) dz$$

C'est-à-dire :

$$\frac{\partial G(z, \bar{z})}{\partial \bar{z}} = 0 \quad (11.31)$$

On vérifie bien si ce terme là est nul :

$$\frac{\partial G(z, \bar{z})}{\partial \bar{z}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial}{\partial x} + i \frac{\partial}{\partial y} \right) G = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial G}{\partial x} + i \frac{\partial G}{\partial y} \right) \quad (11.32)$$

On introduit la notation suivante :

$$F(x, y) = G(z, \bar{z}) = P(x, y) + iQ(x, y) = P + iQ$$

On a donc de (11.32) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial G(z, \bar{z})}{\partial \bar{z}} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial G}{\partial x} + i \frac{\partial G}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial(P + iQ)}{\partial x} + i \frac{\partial(P + iQ)}{\partial y} \right) = \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial P}{\partial x} + i \frac{\partial Q}{\partial x} + i \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\partial Q}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

Comme la fonction  $F$  ou  $G$  est analytique, et en utilisant les conditions de Cauchy (11.24), on a finalement :

$$\frac{\partial G(z, \bar{z})}{\partial \bar{z}} = 0 \quad (11.33)$$

**Définition 11.7** Une fonction  $f(z, \bar{z})$  est analytique en  $z$  si elle ne dépend que de  $z$  soit :

$$\boxed{\frac{\partial f(z, \bar{z})}{\partial \bar{z}} = 0} \quad (11.34)$$

Avec les notations de l'équation (11.22), au point  $a$  du plan ( $p$ ), quelle que soit la direction du vecteur  $\mathbf{a}_0 \mathbf{a}$ , d'affixe  $dz$ , on peut écrire :

$$dZ = f'(z_0)dz = |f'(z_0)|e^{i \cdot \arg f'(z_0)} dz$$

relation qui exprime que le vecteur  $\mathbf{A}_0 \mathbf{A}$  se déduit du vecteur  $\mathbf{a}_0 \mathbf{a}$  par une similitude, dont le rapport est  $|f'(z_0)|$  et l'angle  $\arg f'(z_0)$ .

La représentation du plan ( $p$ ) sur le plan ( $P$ ) est donc conforme. On peut écrire :

$$dS = |dZ| \quad \text{et} \quad ds = |dz| \quad (11.35)$$

Le module linéaire de la représentation est :

$$m = \left| \frac{dZ}{dz} \right|$$

$$\text{et} \quad \arg \left( \frac{dZ}{dz} \right) = \text{Arctg} \left( \frac{\frac{\partial Y}{\partial x}}{\frac{\partial X}{\partial x}} \right) = \alpha \quad (11.36)$$

$\alpha$  angle de la tangente en  $A_0$  à l'image  $y_0$  de la droite  $y = y_0$  du plan ( $p$ ) (**Fig. 11.8**). En effet, cette image est définie en fonction du paramètre  $x$ , par :

$$\begin{cases} X = X(x, y_0) \\ Y = Y(x, y_0) \end{cases} \quad (11.37)$$

Les conditions de Cauchy données par (11.25) se traduisent aussi en disant que les fonctions  $P$  et  $Q$  sont des fonctions harmoniques, c'est-à-dire qu'elles satisfont chacune l'équation de Laplace :

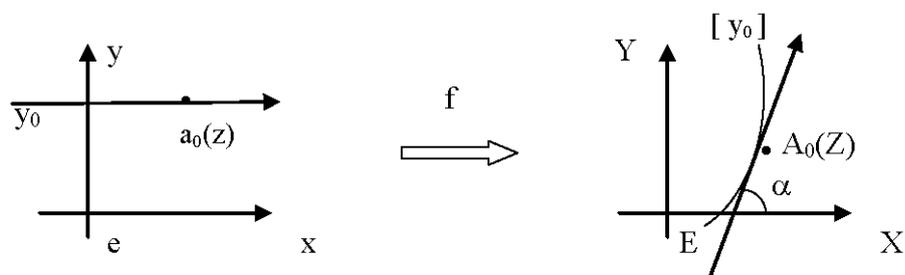


Fig. 11.8 Image de  $y = y_0$

$$\boxed{\begin{array}{l} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} = 0 \end{array}} \quad (11.38)$$

On démontre les propriétés suivantes (*J. Dieudonné*<sup>3</sup>, 1970) :

- si  $f$  est une fonction analytique, elle admet des dérivées de tous les ordres : elle est donc développable en série entière en tout point de son domaine de définition ;

- une fonction analytique est déterminée dans tout son domaine d'existence, si elle est définie dans une région, aussi petite qu'on la suppose, entourant un point  $a$  ; ou même tout le long d'un arc de courbe, aussi petit qu'on le suppose, aboutissant au point  $a$ .

En effet, la connaissance de  $f$  au voisinage de  $a$  permet (théoriquement tout au moins) de former la suite des dérivées de  $f$  au point  $a$ , donc, d'écrire son développement en série de Taylor. Si  $b$  est un point intérieur au cercle de convergence de cette série, on peut alors calculer les dérivées successives de  $f$  au point  $b$ , et ainsi de suite. L'opération est dite prolongement analytique de  $f$ .

3. **Jean Dieudonné** (1906 - 1992) : mathématicien français.

### 9.8.3. Représentation Conforme d'une Surface sur une autre

Conformal mappings play also a fundamental role in modern physics, namely, in string theory and conformal quantum field theory.

(E. Zeidler<sup>4</sup>, 2011)

La représentation d'une surface modèle ( $\sigma$ ) sur une surface image ( $\Sigma$ ) est définie en établissant une correspondance entre les coordonnées curvilignes  $a(u, v)$  de ( $\sigma$ ) et  $A(U, V)$  de ( $\Sigma$ ) :

$$U = U(u, v) \quad (11.39)$$

$$V = V(u, v) \quad (11.40)$$

Le module linéaire est alors :

$$m(u, v) = \frac{dS}{ds} \Rightarrow m^2(u, v) = \frac{dS^2}{ds^2} = \frac{EdU^2 + 2FdU.dV + GdV^2}{edu^2 + 2fdu.dv + gdv^2}$$

En remplaçant  $dU$  et  $dV$  en fonction de  $du$  et  $dv$  en utilisant (11.39) et (11.40), on peut écrire  $dS^2$  sous la forme :

$$dS^2 = \mathcal{E}du^2 + 2\mathcal{F}du.dv + \mathcal{G}dv^2 \quad (11.41)$$

Soient le plan tangent à ( $\sigma$ ) au point  $a(u, v)$ , et deux courbes ( $\gamma_1$ ) et ( $\gamma_2$ ) passant par  $a$  dont les tangentes respectivement à ( $\gamma_1$ ) et ( $\gamma_2$ ) appartiennent au plan tangent.  $(\frac{\partial \mathbf{a}}{\partial u}, \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial v})$  est une base du plan tangent.

Soit la direction de la tangente à ( $\gamma_1$ ) de direction :

$$\frac{\partial \mathbf{a}}{\partial u} du + \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial v} dv$$

De même, soit la direction de la tangente à ( $\gamma_2$ ) de direction :

$$\frac{\partial \mathbf{a}}{\partial u} \delta u + \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial v} \delta v$$

La forme fondamentale de ( $\sigma$ ) est :

$$ds^2 = edu^2 + 2fdu.dv + gdv^2$$

4. E. Zeidler (1905 - 2016) : éminent physicien allemand.

En notant  $\Omega$  l'angle des deux tangentes en  $a$ , on a la relation :

$$\left(\frac{\partial \mathbf{a}}{\partial u} du + \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial v} dv\right) \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{a}}{\partial u} \delta u + \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial v} \delta v\right) = \left\| \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial u} du + \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial v} dv \right\| \cdot \left\| \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial u} \delta u + \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial v} \delta v \right\| \cdot \cos \Omega$$

En posant :

$$ds = \left\| \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial u} du + \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial v} dv \right\| \Rightarrow ds^2 = edu^2 + 2f du \cdot dv + g dv^2$$

et :

$$\delta s = \left\| \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial u} \delta u + \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial v} \delta v \right\| \Rightarrow \delta s^2 = e \delta u^2 + 2f \delta u \cdot \delta v + g \delta v^2$$

Ce qui donne :

$$\cos \Omega = \frac{edu \delta u + f(du \delta v + \delta u dv) + g dv \delta v}{ds \delta s}$$

On pose :

$$\begin{cases} p = \frac{dv}{du} \Rightarrow dv = pdu \\ q = \frac{\delta v}{\delta u} \Rightarrow \delta v = q \delta u \end{cases} \quad (11.42)$$

D'où :

$$\cos \Omega = \frac{edu \delta u + f(du \cdot q \delta u + \delta u \cdot pdu) + g \cdot pdu \cdot q \cdot \delta u}{ds \delta s}$$

ou encore :

$$\cos \Omega = \frac{edu \delta u + f(p+q) du \delta u + gpq du \delta u}{ds \delta s}$$

En utilisant les notations  $p$  et  $q$ , on a :

$$\begin{aligned} ds^2 &= (e + 2fp + gp^2) du^2 \\ \delta s^2 &= (e + 2fq + gq^2) \delta u^2 \end{aligned}$$

On obtient finalement :

$$\boxed{\cos \Omega = \frac{e + f(p+q) + gpq}{\sqrt{e + 2fp + gp^2} \sqrt{e + 2fq + gq^2}}} \quad (11.43)$$

Sur la surface image ( $\Sigma$ ), l'expression de  $dS^2$  donnée par l'équation (11.41) :

$$dS^2 = \mathcal{E} du^2 + 2\mathcal{F} du \cdot dv + \mathcal{G} dv^2$$

Soit  $\Omega'$  l'angle des tangentes correspondantes à  $(\gamma_1)$  et  $(\gamma_2)$ , on a aussi :

$$\boxed{\cos\Omega' = \frac{\mathcal{E} + \mathcal{F}(p+q) + \mathcal{G}pq}{\sqrt{\mathcal{E} + 2\mathcal{F}p + \mathcal{G}p^2} \sqrt{\mathcal{E} + 2\mathcal{F}q + \mathcal{G}q^2}}} \quad (11.44)$$

Il y'a conservation des angles si  $\forall p, q$  on a :

$$\boxed{\cos\Omega = \cos\Omega'} \quad (11.45)$$

En particulier si :

$$q = \frac{\delta v}{\delta u} = 0$$

c'est-à-dire, on prend  $\Omega$  l'angle d'une tangente avec la courbe coordonnée  $v = \text{constante} \Rightarrow \delta v = 0$  et cela suffit. Alors l'équation (11.45) devient  $\forall p = \frac{dv}{du}$  :

$$\frac{e + fp}{\sqrt{e^2 + 2efp + egp^2}} = \frac{\mathcal{E} + \mathcal{F}p}{\sqrt{\mathcal{E}^2 + 2\mathcal{E}\mathcal{F}p + \mathcal{E}\mathcal{G}p^2}}$$

Elevant au carré, les deux membres de l'équation précédente s'écrivent :

$$1 + \frac{f^2p^2 - egp^2}{e^2 + 2efp + egp^2} = 1 + \frac{\mathcal{F}^2p^2 - \mathcal{E}\mathcal{G}p^2}{\mathcal{E}^2 + 2\mathcal{E}\mathcal{F}p + \mathcal{E}\mathcal{G}p^2}$$

En éliminant le 1 et simplifiant par  $p \neq 0$ , on obtient :

$$\frac{f^2 - eg}{e^2 + 2efp + egp^2} = \frac{\mathcal{F}^2 - \mathcal{E}\mathcal{G}}{\mathcal{E}^2 + 2\mathcal{E}\mathcal{F}p + \mathcal{E}\mathcal{G}p^2}$$

Si :

$$f^2 - eg = 0 \Rightarrow \mathcal{F}^2 - \mathcal{E}\mathcal{G} = 0$$

On a donc :

$$\cos\Omega = \cos\Omega' = \pm 1$$

Maintenant on suppose que :

$$f^2 - eg \neq 0 \Rightarrow \mathcal{F}^2 - \mathcal{E}\mathcal{G} \neq 0$$

On doit avoir  $\forall p$  le rapport :

$$\frac{e^2 + 2efp + egp^2}{\mathcal{E}^2 + 2\mathcal{E}\mathcal{F}p + \mathcal{E}\mathcal{G}p^2}$$

égal à  $\frac{f^2 - eg}{\mathcal{F}^2 - \mathcal{E}\mathcal{G}}$ .

Pour cela, il faudra donc  $\forall p$  :

$$\boxed{\frac{e^2 + 2efp + egp^2}{\mathcal{E}^2 + 2\mathcal{E}\mathcal{F}p + \mathcal{E}\mathcal{G}p^2} = \frac{f^2 - eg}{\mathcal{F}^2 - \mathcal{E}\mathcal{G}} = \mu^2(u, v)} \quad (11.46)$$

Ce qui donne (avec  $\mu > 0$ ) :

$$e^2 + 2efp + egp^2 = \mu^2\mathcal{E}^2 + 2\mu^2\mathcal{E}\mathcal{F}p + \mu^2\mathcal{E}\mathcal{G}p^2 \Rightarrow e^2 - \mu^2\mathcal{E}^2 + 2p(ef - \mu^2\mathcal{E}\mathcal{F}) + p^2(eg - \mu^2\mathcal{E}\mathcal{G}) = 0$$

Soit :

$$\begin{cases} e^2 - \mu^2\mathcal{E}^2 = 0 \Rightarrow \mu^2 = \frac{e^2}{\mathcal{E}^2} \\ ef - \mu^2\mathcal{E}\mathcal{F} = 0 \Rightarrow \mu^2 = \frac{ef}{\mathcal{E}\mathcal{F}} \\ eg - \mu^2\mathcal{E}\mathcal{G} = 0 \Rightarrow \mu^2 = \frac{eg}{\mathcal{E}\mathcal{G}} \end{cases}$$

Comme  $\frac{e}{\mathcal{E}} \neq 0$ , on a :

$$\frac{e}{\mathcal{E}} = \frac{f}{\mathcal{F}} = \frac{g}{\mathcal{G}} \Rightarrow \mu^2 = \frac{f^2 - eg}{\mathcal{F}^2 - \mathcal{E}\mathcal{G}}$$

La condition (11.46) est vérifiée si et seulement si :

$$\boxed{\frac{e}{\mathcal{E}} = \frac{f}{\mathcal{F}} = \frac{g}{\mathcal{G}} \Rightarrow \cos\Omega = \cos\Omega' \Rightarrow \begin{cases} \text{la représentation est conforme} \\ \text{et le module linéaire } m = m(u, v) = \frac{1}{\sqrt{\mu(u, v)}} \\ \text{est indépendant de la direction} \end{cases}} \quad (11.47)$$

- Si les coordonnées  $(u, v)$  sont orthogonales ( $f = 0$ ), les deux conditions précédentes à gauche deviennent :

$$\mathcal{F} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\mathcal{E}}{e} = \frac{\mathcal{G}}{g} \quad (11.48)$$

- Si les coordonnées  $(u, v)$  sont symétriques, alors  $e = g$ , les conditions de conformité s'écrivent :

$$\mathcal{F} = 0, \quad \mathcal{E} = \mathcal{G} \Rightarrow \text{les coordonnées } U \text{ et } V \text{ sont symétriques} \quad (11.49)$$

Or :

$$\begin{cases} \mathcal{F} = 0 \Rightarrow U'_u U'_v + V'_u V'_v = 0 \\ \mathcal{E} = \mathcal{G} \Rightarrow U'^2_u + V'^2_u = U'^2_v + V'^2_v \end{cases} \quad (11.50)$$

De la première relation de (11.50), on tire en supposant  $V'_v \neq 0$  :

$$V'_u = -\frac{U'_u U'_v}{V'_v} \quad (11.51)$$

D'où :

$$U'^2_u \left(1 + \frac{U'^2_v}{V'^2_v}\right) = U'^2_v + V'^2_v \Rightarrow (U'^2_u - V'^2_v)(U'^2_v + V'^2_v) = 0$$

Soit :

$$\boxed{U'_u = \pm V'_v} \quad (11.52)$$

L'équation (11.51) donne :

$$\boxed{U'_v = \mp V'_u} \quad (11.53)$$

Les équations (11.52), (11.53) sont, pour les fonctions  $U$  et  $V$ , les conditions de Cauchy.

La correspondance entre le plan des  $(u, v)$  et celui des  $(U, V)$  est une représentation conforme (*G. Julia*, 1955) et on peut poser :

$$Z = U + iV, \quad z = u + iv$$

Toute fonction analytique  $f$  définit une représentation conforme de  $(\sigma)$  sur  $(\Sigma)$ .

$(u, v)$  et  $(U, V)$  étant des coordonnées symétriques, les éléments linéaires  $ds$  et  $dS$  s'écrivent :

$$ds^2 = h^2(u, v)(du^2 + dv^2) \quad \text{ou} \quad ds = |h(u, v)||dz|$$

et :

$$dS^2 = H^2(U, V)(dU^2 + dV^2) \quad \text{ou} \quad dS = |H(U, V)||dZ|$$

Alors le module linéaire est donné par :

$$\boxed{m = \left| \frac{H(U, V)}{h(u, v)} \right| \left| \frac{dZ}{dz} \right|} \quad (11.54)$$

L'argument de  $\frac{dZ}{dz}$  s'interprète d'une manière analogue à ce qui se passe dans la représentation d'un plan sur un plan.

Si en particulier, la surface image est un plan :

$$dS^2 = dX^2 + dY^2$$

et :

$$m = \left| \frac{1}{h(u,v)} \right| \left| \frac{dZ}{dz} \right| \quad (11.55)$$

Si la surface modèle est un modèle de la terre, on a :

$$ds^2 = r^2(d\lambda^2 + dL^2) \quad (11.56)$$

- pour un ellipsoïde :  $r = N \cos \varphi$  et  $L$  est la latitude isométrique ;

- pour une sphère :  $r = a \cos \varphi$  et  $L$  est la latitude croissante ou latitude de Mercator.

Pour une représentation plane conforme, le modèle linéaire est :

$$m = \frac{1}{r} \left| \frac{dZ}{dz} \right| \quad (11.57)$$

avec  $z = \lambda + iL$  et  $Z = X + iY$  ou  $z = L + i\lambda$  et  $Z = Y + iX$ . Dans ce dernier cas, on a :

$$\frac{dZ}{dz} = \frac{\partial Y}{\partial L} + i \frac{\partial X}{\partial L} \quad (11.58)$$

Donc :

$$\arg \left( \frac{dZ}{dz} \right) = \text{Arctg} \left( \frac{\frac{\partial X}{\partial L}}{\frac{\partial Y}{\partial L}} \right) = \text{Arctg} \left( \frac{dX}{dY} \right) \quad (11.59)$$

qui n'est autre que le gisement de l'image du méridien (*J. Commiot, 1980*).

### 11.9 Les Représentations ou Transformations Quasi-Conformes

Dans les paragraphes précédents, on a étudié les représentations de la sphère avec les variables  $(L_M, \lambda)$  ou celles de l'ellipsoïde de révolution avec les coordonnées  $(L, \lambda)$  vers le plan  $(X, Y)$  avec :

$$\begin{cases} X = X(L_M, \lambda) \\ Y = Y(L_M, \lambda) \end{cases} \quad (11.60)$$

$$\text{ou} \quad \begin{cases} X = X(L, \lambda) \\ Y = Y(L, \lambda) \end{cases} \quad (11.61)$$

en notant :

$$L_M = \text{Logtg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \quad \text{la latitude de Mercator}$$

$$L = \text{Logtg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - \frac{e}{2} \text{Log} \frac{1 + e \sin \varphi}{1 - e \sin \varphi} \quad \text{la latitude isométrique}$$

En posant :

$$z = L_M + i\lambda \quad (\text{ou } z = L + i\lambda) \quad (11.62)$$

$$Z = X + iY \quad (11.63)$$

on a considéré les représentations conformes (c'est-à-dire qui conservent les angles) ou encore définies par :

$$Z = Z(z) \quad (11.64)$$

avec  $Z(z)$  une fonction dite holomorphe de  $z$  soit :

$$\frac{\partial Z}{\partial \bar{z}} = 0$$

où  $\bar{z}$  est le conjugué de  $z$  soit  $\bar{z} = L_M - i\lambda$  (ou  $\bar{z} = L - i\lambda$ ).

**Définition 11.8** Une fonction  $f(z) = Z = Z(z)$  définie et dérivable sur un domaine  $\mathcal{D} \subset \mathbf{C}$  (l'ensemble des nombres complexes) est dite quasi-conforme si elle vérifie (L. Bers, 1977) :

$$\boxed{\frac{\partial Z}{\partial \bar{z}} = \mu(z) \cdot \frac{\partial Z}{\partial z} \quad \text{avec } |\mu(z)| < 1} \quad (11.65)$$

Le coefficient  $\mu$  s'appelle coefficient de Beltrami<sup>5</sup>.

### 9.9.1. Développement d'une fonction en un point $z_0$

Soit  $f$  une fonction quasi-conforme et un point  $z_0 \in \mathcal{D}$ . En écrivant un développement de  $f$  au point  $z_0$ , on a alors :

$$f(z) = f(z_0) + (z - z_0) \frac{\partial f}{\partial z}(z_0) + (\bar{z} - \bar{z}_0) \frac{\partial f}{\partial \bar{z}}(\bar{z}_0) + \dots$$

Par un changement de variables, on peut prendre  $z_0 = 0$ , d'où :

5. **Eugeno Beltrami** (1835-1899) : mathématicien italien.

$$f(z) = f(z_0) + z \frac{\partial f}{\partial z}(z_0) + \bar{z} \frac{\partial f}{\partial \bar{z}}(\bar{z}_0) + \dots$$

Utilisant (11.65), l'équation précédente s'écrit en négligeant les termes du deuxième degré :

$$f(z) = f(z_0) + z \frac{\partial f}{\partial z}(z_0) + \bar{z} \mu(z_0) \cdot \frac{\partial f}{\partial z}(z_0)$$

Donc  $f(z)$  s'écrit localement :

$$f(z) = \alpha + \beta z + \gamma \bar{z} \quad (11.66)$$

$$\text{où } \alpha, \beta, \gamma \text{ des constantes complexes avec } \left| \frac{\gamma}{\beta} \right| < 1 \quad (11.67)$$

### 9.9.2. Etude de la Transformée d'un cercle

On sait que pour une transformation conforme, l'image d'un cercle autour d'un point est un cercle (ou encore l'indicatrice de Tissot est un cercle). Soit un point  $z_0$  qu'on peut prendre égal à 0. Par un changement de l'origine des axes, la fonction  $f$  s'écrit :

$$f(z) = \beta z + \mu \beta \bar{z}$$

Par abus, on garde la même notation. On considère autour de l'origine  $z_0 = 0$  un point  $M(x = a \cos \theta, y = a \sin \theta)$  qui décrit un cercle infiniment petit de rayon  $a$ . On étudie ci-après l'image du point  $M$  par  $f$ .

De l'équation précédente, on a :

$$\begin{aligned} z &= a \cos \theta + i a \sin \theta = a e^{i\theta} \\ \mu &= |\mu| e^{ik} \\ \beta &= |\beta| e^{il} \\ f(z) &= a |\beta| e^{il} (e^{i\theta} + |\mu| e^{i(k-\theta)}) \end{aligned} \quad (11.68)$$

Si  $\theta_1 = \frac{k}{2} = \frac{\arg(\mu)}{2}$ , on a  $z_1 = a e^{ik/2}$  et :

$$\begin{aligned} f(z_1) &= a |\beta| e^{il} e^{ik/2} (1 + |\mu|) \\ |f(z_1)| &= a |\beta| (1 + |\mu|) \end{aligned} \quad (11.69)$$

Maintenant on prend  $\theta_2 = \theta_1 + \frac{\pi}{2} = \frac{k}{2} + \frac{\pi}{2}$ , alors  $z_2 = ae^{i\theta_2} = ae^{ik/2}e^{i\pi/2} = iae^{ik/2}$  et on obtient :

$$\begin{aligned} f(z_2) &= ia|\beta|e^{il}e^{ik/2}(1-|\mu|) \\ |f(z_2)| &= a|\beta|(1-|\mu|) \end{aligned} \quad (11.70)$$

en tenant compte que  $|\mu| < 1$ .

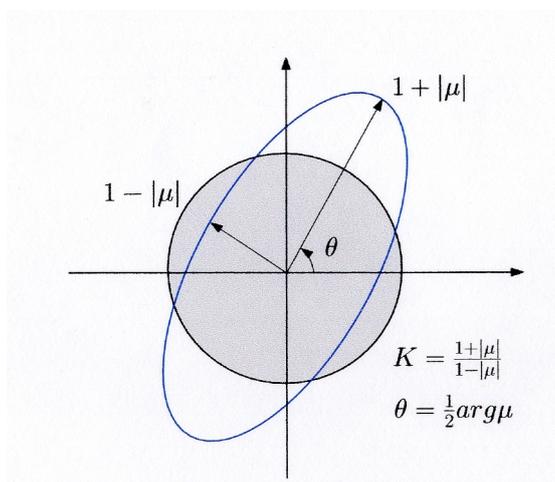
Des équations (11.68), (11.69) et (11.70), on déduit que l'image de  $M$  décrit une ellipse de demi-grand axe et demi-petit axe respectivement (**Fig. 11.9**) :

$$\begin{cases} a' = a|\beta|(1+|\mu|) \\ b' = a|\beta|(1-|\mu|) \end{cases} \quad (11.71)$$

On appelle :

$$K = \frac{1+|\mu|}{1-|\mu|} \quad (11.72)$$

*coefficient de distortion ou de dilatation.*



**Fig. 11.9** L'image d'un cercle

### 9.9.3. Calcul d'un élément de longueur sur le Plan

Un élément de longueur sur le plan est donné par :

$$dS^2 = dX^2 + dY^2 = |df|^2 = df \cdot \bar{df}$$

Comme  $df = \beta dz + \gamma d\bar{z}$  et  $\bar{df} = \bar{\beta} d\bar{z} + \bar{\gamma} dz$ , on a alors :

$$\begin{aligned} dS^2 = dX^2 + dY^2 &= |df|^2 = df \cdot \bar{df} = (\beta dz + \gamma d\bar{z})(\bar{\beta} d\bar{z} + \bar{\gamma} dz) \\ &= \beta \bar{\beta} dz d\bar{z} + \gamma \bar{\gamma} dz dz + dz d\bar{z} \left( \beta \bar{\gamma} \frac{dz}{d\bar{z}} + \gamma \bar{\beta} \frac{d\bar{z}}{dz} \right) \end{aligned}$$

On pose :

$$ds^2 = dz \cdot d\bar{z}$$

Le carré du module linéaire de la transformation quasi-conforme s'écrit :

$$m^2 = \frac{dS^2}{ds^2} = |\beta|^2 + |\gamma|^2 + \left( \beta \bar{\gamma} \frac{dz}{d\bar{z}} + \gamma \bar{\beta} \frac{d\bar{z}}{dz} \right) \quad (11.73)$$

Dans l'équation (11.73), on considère  $z = ae^{i\theta}$  varie le long d'un cercle de rayon  $a$  infiniment petit et on fait tendre  $\theta \rightarrow 2\pi$ . Alors, on obtient :

$$\begin{aligned} \frac{dz}{d\bar{z}} &= \frac{aie^{i\theta} d\theta}{-aie^{-i\theta} d\theta} = -e^{2i\theta} = -1 \\ \frac{d\bar{z}}{dz} &= -e^{-2i\theta} = -1 \end{aligned}$$

L'équation (11.73) devient :

$$m^2 = \frac{dS^2}{ds^2} = |\beta|^2 + |\gamma|^2 - (\beta \bar{\gamma} + \gamma \bar{\beta})$$

Comme :

$$\gamma = \mu\beta$$

on obtient :

$$m^2 = \frac{dS^2}{ds^2} = |\beta|^2 + |\beta|^2 |\mu|^2 - (\beta \bar{\beta} \bar{\mu} + \mu \beta \bar{\beta}) \quad (11.74)$$

or  $\mu + \bar{\mu} = 2|\mu| \cos \arg(\mu)$ , par suite l'équation (11.74) s'écrit :

$$m^2 = \frac{dS^2}{ds^2} = |\beta|^2 (1 + |\mu|^2 - 2|\mu| \cos \arg(\mu)) \quad (11.75)$$

Remplaçant  $\beta$  par  $\frac{\partial f}{\partial z}(z_0)$ , (11.75) devient :

$$m^2 = \frac{dS^2}{ds^2} = \left| \frac{\partial f}{\partial z}(z_0) \right|^2 (1 + |\mu|^2 - 2|\mu|\cos\arg(\mu)) \quad (11.76)$$

#### 9.9.4. Exemple de Transformation Quasi-conforme

Lors de passage de coordonnées planes  $(X, Y)_i$  d'un système géodésique  $S_1$  à des coordonnées planes  $(X', Y')_j$  dans un autre système géodésique  $S_2$ , on utilise souvent une transformation du type :

$$\begin{cases} X' = X_0 + aX + bY \\ Y' = Y_0 + cX + dY \end{cases} \quad (11.77)$$

ou encore sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \quad (11.78)$$

En posant  $Z = X' + iY'$  et  $z = X + iY$ , on obtient :

$$Z = (X_0 + iY_0) + X(a + ic) + Y(b + id) \quad (11.79)$$

On note par :

$$Z_0 = X_0 + iY_0$$

Comme  $X = (z + \bar{z})/2$  et  $Y = (z - \bar{z})/2i$ , alors l'équation (11.79) s'écrit :

$$Z = Z_0 + z \left( \frac{a+d}{2} + i \frac{c-b}{2} \right) + \bar{z} \left( \frac{a-d}{2} + i \frac{b+c}{2} \right) \quad (11.80)$$

On pose :

$$\beta = \frac{a+d}{2} + i \frac{c-b}{2}, \quad \gamma = \frac{a-d}{2} + i \frac{b+c}{2}$$

Alors (11.80) s'écrit :

$$Z = Z_0 + \beta z + \gamma \bar{z} \quad (11.81)$$

Pour quelles valeurs de  $a, b, c, d$  la transformation (11.78) est quasi-conforme ?  
En comparant (11.80) avec (11.66), il faut que  $|\gamma| < |\beta|$  soit :

$$\begin{aligned} |\gamma| < |\beta| &\Rightarrow |\gamma|^2 < |\beta|^2 \Rightarrow \frac{(a-d)^2 + (b+c)^2}{4} < \frac{(a+d)^2 + (c-b)^2}{4} \\ &\Rightarrow ad - bc > 0 \end{aligned} \quad (11.82)$$

C'est-à-dire que le déterminant de la matrice (11.78) soit strictement positif.

**Note historique :** La représentation stéréographique de la sphère au plan est l'une des représentations la plus utilisée depuis l'antiquité (voir exercices  $\text{ni}_{\frac{1}{2}}1$  et  $\text{ni}_{\frac{1}{2}}5$  ci-dessous). Elle était connue par l'astronome et mathématicien Hipparque (190-120 avant J.C) ainsi que Claude Ptolémée (80-168). Ce dernier connaît que la représentation stéréographique transforme les cercles en cercles ou en droites, mais on ignore s'il savait que l'image de tout cercle de la sphère est un cercle ou une droite. Cette propriété fut démontrée par l'astronome et ingénieur arabe Abul Abbas Al-Farghani (805-880), qui vivait entre le Caire et Bagdad au milieu du 9ème siècle. Cette représentation était employée dans la confection des astrolabes.

C'était Thomas Harriot (1560-1621) mathématicien et astronome anglais qui avait montré que la représentation stéréographique était conforme et approuvée par un papier présenté par l'astronome Edmond Halley (1656-1742) à la Société Royale de Londres.

Le terme "projection stéréographique" fut donné par le mathématicien belge et d'origine espagnole François d'Aiguillon (1567-1617) en 1613 dans le sixième chapitre concernant les projections de son livre d'optique "Opticorum liber extus de projectionibus".

Rappelons que l'histoire des représentations conformes était le point de départ de la géométrie différentielle moderne avec le papier de Carl Friedrich Gauss de 1827 sur la théorie générale des surfaces. Un autre apport considérable était venu du travail du mathématicien français Gaspard Monge (1746-1818) spécialement son livre sur l'application de l'analyse à la géométrie. (H.A. Kastrup, 2008)

## 11.10 Exercices et Problèmes

**Problème 11.1** Soit  $(S^2)$  la sphère de rayon  $R$ , au point  $P(\varphi, \lambda)$  on lui fait correspondre le point  $p(X, Y)$  du plan  $OXY$  par la représentation plane suivante définie par les formules :

$$p(X, Y) \begin{cases} X = 2R.tg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right).sin\lambda \\ Y = -2R.tg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right).cos\lambda \end{cases}$$

1. Montrer que l'image d'un méridien ( $\lambda = \text{constante}$ ) est une droite dont on donne l'équation.
2. Montrer que l'image d'un parallèle ( $\varphi = \text{constante}$ ) est un cercle dont on précise l'équation.
3. En utilisant le lemme de Tissot, déterminer les directions principales.
4. Soit  $dS$  la longueur infinitésimale correspondante sur le plan, calculer  $dS$ .
5. Sachant que sur la sphère  $ds^2 = R^2d\varphi^2 + R^2cos^2\varphi.d\lambda^2$ , calculer le module linéaire  $m$ .
6. En déduire le module linéaire  $m_1$  le long du méridien.
7. En déduire le module linéaire  $m_2$  le long d'un parallèle.
8. Comparer  $m_1$  et  $m_2$ . Conclure sur la conformité ou la non conformité de la représentation plane.

**Problème 11.2** Soit  $(\Sigma)$  la sphère de rayon  $R$ , au point  $P(\varphi, \lambda)$  on lui fait correspondre le point  $p(X, Y)$  du plan  $OXY$  par la représentation plane suivante définie par les formules :

$$p(X, Y) \begin{cases} X = R.\lambda \\ Y = R.Logtg\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \end{cases}$$

où  $Log$  désigne le logarithme népérien.

1. Quelles sont les images des méridiens ( $\lambda = \text{constante}$ ) et des parallèles ( $\varphi = \text{constante}$ ).
2. Soit  $dS$  la longueur infinitésimale correspondante sur le plan, calculer  $dS$  en fonction de  $\varphi$  et de  $\lambda$  et calculer le module linéaire  $m$ .
3. En déduire les modules linéaires  $m_1$  le long du méridien et  $m_2$  le long du parallèle.
4. Comparer  $m_1$  et  $m_2$  et conclure sur la conformité ou la non conformité de la représentation plane.
5. On suppose que  $P$  décrit sur la surface  $(\Sigma)$  une courbe  $(\gamma)$  telle que  $\varphi$  et  $\lambda$  sont liées par la relation :  $tg\varphi = sin\lambda$ . Pour  $\varphi = 0gr, 2gr, 4gr, 6gr, 8gr$  et  $10gr$ , dresser un tableau donnant les valeurs de  $\lambda$  correspondantes.

6. Sachant que  $R = 1000\text{ m}$ , calculer les coordonnées  $(X, Y)$  de la représentation plane donnée ci-dessus pour les valeurs de  $\varphi$  et  $\lambda$  de la question 5.

7. Reporter à l'échelle  $1/100$  sur le plan  $OXY$ , les positions  $(X, Y)$  des points. Que pensez-vous de l'image de la courbe  $(\gamma)$ .

**Problème 11.3** Sur une sphère de rayon unité, modèle de la terre, on désigne :

- par  $p$  le pôle nord ;
- par  $(C)$  un grand cercle qui coupe l'équateur au point  $i$  de longitude nulle ;
- par  $q$  le pôle de ce grand cercle, de latitude  $\varphi_0$  positive,
- par  $\omega$  et  $h$  respectivement les points d'intersection de  $(C)$  et du méridien de  $q$  et du grand cercle issu de  $q$ , passant par le point  $a(\varphi, \lambda)$ .

On pose :  $\omega h = x$ ,  $h a = y$ .

1.  $q$  est le pivot d'une représentation cylindrique conforme oblique tangente, dont  $(C)$  est le "pseudo-équateur". Le plan est rapporté aux axes  $\Omega X, \Omega Y$  images respectives de  $(C)$  et du grand cercle  $\omega pq$ . Exprimer en fonction de  $\varphi, \lambda$  et  $\varphi_0$  les coordonnées  $X, Y$  du point  $A$  image de  $a$  (vérifier que pour  $\varphi_0 = 0$ , on retrouve les expressions de  $X, Y$  d'une représentation transverse).

2. Montrer que l'équation de l'image plane du parallèle de latitude  $\varphi_0$  peut s'écrire :

$$e^Y \cos X = tg \varphi_0$$

Indications :  $b$  désignant un point de latitude  $\varphi_0$ , le triangle  $pqb$  est isocèle, décomposer ce triangle en deux triangles rectangles égaux. Etudier qualitativement les images des autres parallèles.

3. Montrer que l'image plan de l'équateur a pour équation :

$$\cos X + tg \varphi_0 \cdot sh Y = 0$$

Ecrire d'une manière analogue, l'équation de l'image du méridien  $\lambda = 0$ .

4. Exprimer le gisement du méridien en fonction de  $\varphi, \lambda$  et  $\varphi_0$ . Déterminer la valeur du module linéaire, en particulier en  $p$ , en un point de l'équateur, et en un point du méridien origine.

**Problème 11.4** Etude de la représentation conforme d'une sphère de rayon unité dite représentation de Littrow<sup>6</sup> définie par :

6. En hommage à **Joseph Johann Littrow** (1781-1840) astronome autrichien.

$$Z = \sin z$$

avec  $z = \lambda + iL_M$ ,  $L_M$  la latitude de Mercator et  $Z = X + iY$ .

1. Préciser le canevas, les images des méridiens et celle de l'équateur.
2. Vérifier que les points  $f$  et  $f'$  ( $\varphi = 0, \lambda = \pm\pi/2$ ) sont des points singuliers.
3. Etudier les images plans des cercles de diamètre  $ff'$  et des petits cercles orthogonaux.
4. Soit  $s$  le point ( $\varphi = \varphi_0, \lambda = 0$ ). On appelle segment capable sphérique l'ensemble des points  $b$  tels que l'angle  $\widehat{bp, bs} = \alpha$ . Quelle est l'image plane de cette courbe dans cette représentation plane.

**Problème 11.5** Soit l'application  $F(u, v) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3 \setminus (0, 0, 1)$  définie par :

$$OM(u, v) = F(u, v) \begin{cases} x = \frac{2u}{u^2 + v^2 + 1} \\ y = \frac{2v}{u^2 + v^2 + 1} \\ z = \frac{u^2 + v^2 - 1}{u^2 + v^2 + 1} \end{cases}$$

1. Calculer la forme fondamentale  $ds^2$ .
2. Montrer que  $OM(u, v)$  appartient à la sphère ( $\mathbb{S}^2$ ) d'équation  $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ .
3. Calculer  $u, v$  en fonction de  $x, y$  et  $z$ .
4. Soit le point  $N(0, 0, 1)$  de ( $\mathbb{S}^2$ ), calculer les coordonnées  $(X, Y)$  du point  $p$  intersection de la droite  $NM$  avec la plan  $z = 0$  en fonction de  $x, y$  et  $z$ .
5. Soit  $\sigma$  l'application  $\mathbb{R}^3 \setminus (0, 0, 1) \rightarrow \mathbb{R}^2 : (x, y, z) \rightarrow (X, Y) = (X(x, y, z), Y(x, y, z))$ . Montrer que  $(\sigma \circ F)(u, v) = \sigma(F(u, v)) = (u, v)$ . En déduire que  $F = \sigma^{-1}$ .
6. Trouver le rapport de ce problème avec le problème 11.1.

**Problème 11.6** Soit un ellipsoïde de révolution  $E(a, e)$  avec  $a$  et  $e$  respectivement le demi-grand axe de l'ellipsoïde de révolution et  $e$  la première excentricité. Soit ( $\mathbb{S}^2$ ) une sphère de rayon  $R$ . On veut étudier le passage suivant :

$$p(\varphi, \lambda) \text{ de l'ellipsoïde } E \Rightarrow P(\psi, \Lambda) \text{ de la sphère } \mathbb{S}^2$$

1. Exprimer  $m$  le module linéaire de cette représentation.

2. On pose :

$$z = \mathcal{L} + i\lambda, \quad Z = L + i\Lambda$$

$\mathcal{L}$  est la latitude isométrique de l'ellipsoïde de révolution et  $L$  la latitude de Mercator. Une transformation conforme entre  $E$  et  $(\mathbb{S}^2)$  est donnée par  $Z = f(z)$  où  $f$  est une fonction analytique. On propose le cas le plus simple à savoir :

$$Z = \alpha z + \beta$$

avec  $\begin{cases} \alpha = c_1 + ic_2 \\ \beta = b_1 + ib_2 \end{cases}$

les  $c_1, c_2, b_1, b_2$  sont des constantes réelles. Donner les expressions de  $L$  et  $\Lambda$  en fonction de  $\mathcal{L}$  et  $\lambda$ .

3. On veut que représentation transforme les méridiens et les parallèles de l'ellipsoïde respectivement en méridiens et parallèles de la sphère et que l'image du méridien origine  $\lambda = 0$  soit le méridien origine de la sphère  $\Lambda = 0$ . Montrer que  $c_2 = b_2 = 0$  et  $L = c_1\mathcal{L} + b_1$ ,  $\Lambda = c_1\lambda$ .

4. Pour avoir la même orientation en longitude, on prendra  $c_1 > 0$ . On cherchera la transformation à déformation minimale autour d'un parallèle  $\varphi = \varphi_0$  tel que le parallèle  $\varphi = \varphi_0$  est automécoïque et le module linéaire  $m$  est stationnaire pour  $\varphi = \varphi_0$ , c'est-à-dire  $m(\varphi_0) = 1$  et  $\left(\frac{dm}{d\varphi}\right)\Big|_{\varphi=\varphi_0} = 0$ , en plus on considère aussi la condition :

$$\left(\frac{d^2m}{d\varphi^2}\right)\Big|_{\varphi=\varphi_0} = 0$$

Pour faciliter les notations, on prendra  $b = b_1, c = c_1$ . Montrer que la relation liant  $\varphi_0$  et  $\psi_0$  est :

$$\operatorname{tg}\psi_0 = \operatorname{tg}\varphi_0 \sqrt{\frac{1-e^2}{1-e^2\sin^2\varphi_0}}$$

5. Déterminer les constantes  $b, c$  et  $R$  en fonction de  $\varphi_0$  et  $\psi_0$  telles que les conditions ci-dessus soient vérifiées.

6. Montrer que l'expression du développement limité de  $m(\varphi)$  de part et d'autre du parallèle  $\varphi_0$  est donnée par :

$$m(\varphi) = 1 - \frac{2e^2(1-e^2)\sin\varphi_0\cos\varphi_0}{3(1-e^2\sin^2\varphi_0)^2}(\varphi - \varphi_0)^3 + o((\varphi - \varphi_0)^4)$$

7. On fait intervenir la deuxième excentricité  $e'$ , Montrer que  $m(\varphi)$  s'écrit :

$$m(\varphi) = 1 - \frac{2e'^2 \sin\varphi_0 \cos\varphi_0}{3(1 + e'^2 \cos^2\varphi_0)^2} (\varphi - \varphi_0)^3 + o((\varphi - \varphi_0)^4)$$

**Problème 11.7** Soit  $\mathcal{E}(a,b)$  un ellipsoïde de référence de paramètres  $a$  et  $b$  et  $e$  respectivement le demi-grand axe et la première excentricité. On considère une représentation plane  $\mathcal{P}$  de  $\mathcal{E}$  vers le plan  $(O, X, Y)$ . On pose :

$$\begin{aligned} z &= \lambda + i\mathcal{L} \\ Z &= X + iY = Z(z) \end{aligned}$$

avec  $\mathcal{L}$  la latitude isométrique.

1. Ecrire les expressions du carré des éléments infinitésimaux de longueur sur l'ellipsoïde et le plan. En déduire le module linéaire  $m$ .

2. On pose  $\zeta = \frac{\partial Z}{\partial z}$ . Si  $\gamma$  est le gisement de l'image du méridien passant par le point  $z = (\lambda, \mathcal{L})$ , montrer que  $\arg(\zeta) = \frac{\pi}{2} - \gamma$ .

3. On cherche une représentation plane du type  $Z = \alpha + \beta z + \varpi z^2$  où  $\alpha, \beta$  et  $\varpi$  des constantes complexes. On impose les conditions suivantes :

- pour  $z = 0$ ,  $Z = 0$  ;
- l'axe des  $Y$  coïncide avec le méridien à l'origine.

Montrer que  $\operatorname{Re}(\beta) = 0$ .

4. En déduire que  $Z$  s'écrit :  $Z = i\beta_1 z + (\varpi_1 + i\varpi_2)z^2$  avec  $\beta_1, \varpi_1, \varpi_2$  des réels.

**Problème 11.8** L'objet de ce problème est l'étude de la comparaison de deux réseaux géodésique par l'effet d'une translation tridimensionnelle. On commence par l'étude d'un modèle sphérique, puis celui d'un modèle ellipsoïdique. Le point de départ est deux calculs  $R_1$  et  $R_2$  d'un réseau géodésique  $\mathcal{R}$  qu'on considère au voisinage de l'équateur.

I. On considère que les coordonnées de  $R_1$  et  $R_2$  sont exprimées par la représentation plane Mercator directe d'un modèle sphérique (de rayon  $a$ ). Un point  $M$  a pour coordonnées :

$$M(X = a\cos\varphi\cos\lambda, Y = a\cos\varphi\sin\lambda, Z = a\sin\varphi)$$

1. Exprimer les coordonnées géodésiques  $(\varphi, \lambda)$  en fonction des coordonnées tridimensionnelles  $X, Y, Z$ .

2. Une translation tridimensionnelle infinitésimale est exprimée par  $(dX, dY, dZ)$  des formules ci-dessus. Montrer que  $d\varphi$  et  $d\lambda$  en fonction de  $dX, dY$  et  $dZ$

donnent :

$$d\lambda = \frac{-\sin\lambda}{a\cos\varphi}dX + \frac{\cos\lambda}{a\cos\varphi}dY$$

$$\frac{d\varphi}{\cos\varphi} = \frac{dZ}{a} - \frac{\operatorname{tg}\varphi\cos\lambda}{a}dX - \frac{\operatorname{tg}\varphi\sin\lambda}{a}dY$$

Or l'équation ci-dessus n'est autre que la différentielle de la latitude de Mercator  $L$ , d'où :

$$dL = \frac{d\varphi}{\cos\varphi} = \frac{dZ}{a} - \frac{\operatorname{tg}\varphi\cos\lambda}{a}dX - \frac{\operatorname{tg}\varphi\sin\lambda}{a}dY$$

3. On se place au voisinage du point central  $M_0(\varphi = 0, \lambda = 0)$  de l'équateur, on peut écrire au deuxième ordre de petitesse :

$$\cos\varphi = 1 - \frac{\varphi^2}{2}, \quad \sin\lambda = \lambda, \quad \cos\lambda = 1 - \frac{\lambda^2}{2}$$

A partir de la formule de  $L$  montrer qu'on peut écrire  $L \approx \varphi$ .

4. Montrer qu'on peut écrire alors :

$$dL = \frac{dZ}{a} - \frac{dX}{a}L - \frac{dY}{a}L$$

$$d\lambda = \frac{-\lambda(1 + \frac{L^2}{2})}{a}dX + \frac{(1 - \frac{\lambda^2}{2})(1 + \frac{L^2}{2})}{a}dY$$

5. En gardant les termes du 2ème ordre, simplifier l'expression de  $d\lambda$ .

6. On pose :  $z = \lambda + iL$  et  $\xi = d\lambda + idL$ . Montrer alors la formule de **Dufour-Fezzani** (H.M. Dufour, 1979) :

$$\xi = \frac{dY + idZ}{a} - \frac{dX}{a}z - \frac{dY}{2a}z^2$$

7. La transformation  $\xi$  est-elle conforme.

II. On considère que les coordonnées de  $R_1$  et  $R_2$  sont exprimées par la représentation UTM d'un modèle ellipsoïdique  $E(a, e)$ ,  $a$  et  $e$  sont respectivement le demi-grand axe et la première excentricité. Un point  $M$  du modèle ellipsoïdique a pour coordonnées :

$$M (X = N\cos\varphi\cos\lambda, Y = N\cos\varphi\sin\lambda, Z = N(1 - e^2).\sin\varphi)$$

avec :  $N = a/\sqrt{1 - e^2\sin^2\varphi}$ . Les coordonnées géodésiques  $(\varphi, \lambda)$  sont exprimées par :

$$\operatorname{tg}\lambda = \frac{Y}{X}, \quad (1 - e^2)\operatorname{tg}\varphi = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

8. On considère une translation tridimensionnelle infinitésimale  $(dX, dY, dZ)$ . On note par  $\mathcal{L}$  la latitude isométrique :

$$\mathcal{L} = \text{Logtg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - \frac{e}{2} \text{Log} \frac{1 + e \sin \varphi}{1 - e \sin \varphi} = L - \frac{e}{2} \text{Log} \frac{1 + e \sin \varphi}{1 - e \sin \varphi}$$

On opère de la même manière qu'en I., montrer qu'au deuxième ordre de petitesse, on a :

$$\begin{aligned} d\lambda &= \frac{-dX}{a} \lambda + \frac{dY}{a} + (1 + e^2) \mathcal{L}^2 \frac{dY}{2a} - \frac{\lambda^2}{2a} dY \\ d\mathcal{L} &= \frac{dZ}{a} - \frac{\mathcal{L}^2 dZ}{2a} - \frac{3e^2 \mathcal{L}^2 dZ}{2a} - \mathcal{L} \frac{dX}{a} - \lambda \mathcal{L} \frac{dY}{a} \end{aligned}$$

9. On pose :  $z = \lambda + i\mathcal{L}$ ,  $\zeta = d\lambda + id\mathcal{L}$ . Montrer alors, la formule de **Dufour-Ben Hadj Salem** (A. Ben Hadj Salem, 2012) :

$$\zeta = \frac{dY + idZ}{a} - \frac{dX}{a} z - \frac{dY}{2a} z^2 - \frac{e^2 (dY - idZ)}{8a} (z - \bar{z})^2$$

10. La transformation  $\zeta$  est-elle conforme.

**Problème 11.9** Pour une représentation plane, on dit qu'elle est **équivalente** si le produit des modules linéaires  $m_1$  et  $m_2$  suivant les directions principales vérifient :

$$m_1 \cdot m_2 = 1$$

Soit le modèle terrestre représenté par la sphère de rayon  $R$  qu'on note  $S^2$ . Au point  $P(\varphi, \lambda)$  on lui fait correspondre le point  $p(X, Y)$  du plan  $OXY$  par la représentation plane suivante définie par les formules :

$$p(X, Y) = \left( X = 2R \cdot \sin \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \cos \lambda, \quad Y = 2R \cdot \sin \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \sin \lambda \right) \quad (11.83)$$

1. Qu'elle est l'image du pôle nord  $P_N$  ?
2. Montrer que l'image d'un méridien ( $\lambda = \lambda_0 = \text{constante}$ ) est une droite qu'on donne l'équation.
3. Montrer que l'image d'un parallèle ( $\varphi = \varphi_0 = \text{constante}$ ) est un cercle qu'on précise l'équation.
4. En utilisant le lemme de Tissot, déterminer les directions principales.
5. Soit  $ds$  la longueur infinitésimale correspondante sur la sphère, donner l'expression de  $ds^2$ .
6. Soit  $dS$  la longueur infinitésimale correspondante sur le plan. Montrer que :

$$dS^2 = R^2 \cos^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) d\varphi^2 + 4R^2 \sin^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) d\lambda^2$$

7. En déduire le carré du module linéaire  $m^2$ .
8. Calculer le module linéaire  $m_1$  le long du parallèle.
9. Calculer le module linéaire  $m_2$  le long du méridien.
10. La représentation plane définie par (11.83) est-elle équivalente. Justifier votre réponse.

# Chapitre 12

## *La Représentation Plane Lambert*

### 12.1 Définition et Propriétés

La représentation plane Lambert est une représentation conique, conforme et directe d'un modèle ellipsoïdique :

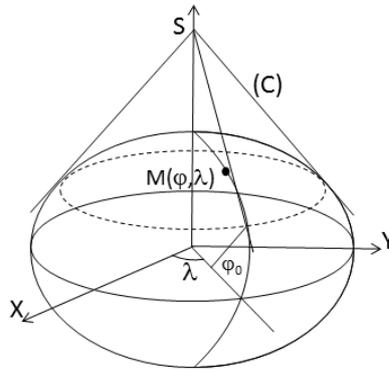
- conique : on utilise les coordonnées polaires  $R$  et  $\Omega$  ;
- conforme : conservation des angles ou l'altération angulaire est nulle ;
- directe : les coordonnées polaires sont des fonctions de la forme :

$$\begin{array}{l} R = R(\varphi) \\ \Omega = \Omega(\lambda) \end{array}$$

où  $(\varphi, \lambda)$  sont les coordonnées d'un point sur le modèle ellipsoïdique de référence.

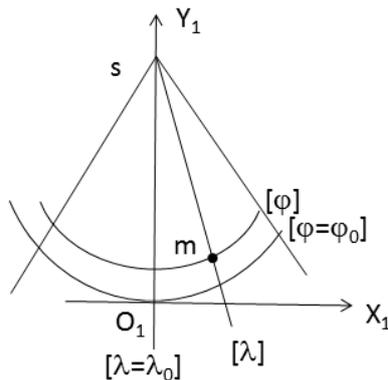
Pour la Tunisie, on a considéré le cas de la représentation tangente c'est-à-dire on utilise un seul parallèle origine. Dans la suite du cours, on va étudier en détail le cas d'un seul parallèle origine.

Une interprétation de la représentation plane Lambert est comme suit :



**Fig. 12.1** Interprétation géométrique

- on considère un cône ( $C$ ) (**Fig. 12.1**) de sommet  $S$  tangent au parallèle origine de latitude  $\varphi_0$  de l'ellipsoïde de référence  $\mathcal{E}$ . A un point  $M(\varphi, \lambda)$  de  $\mathcal{E}$ , on lui fait correspondre son image  $m$  sur la demi-droite d'origine  $S$  tangente à la méridienne de longitude  $\lambda$  et au parallèle origine.
- on développe le cône ( $C$ ) sur le plan, on obtient l'image d'une portion de l'ellipsoïde (**Fig. 12.2**).



**Fig. 12.2** Images des parallèles et des méridiens

Les images des parallèles sont des arcs de cercles concentriques de centre  $s$  l'image du sommet du cône ( $C$ ), celles des méridiens sont des droites concordantes passant par  $s$  (**Fig. 12.2**).

Les courbes coordonnées  $\varphi = \text{constante}$  et  $\lambda = \text{constante}$  sur le modèle sont orthogonales et leurs images le sont aussi dans le plan.

## 12.2 Indicatrice de Tissot

D'après la propriété précédente des courbes coordonnées, on déduit que les directions principales sont les tangentes au méridien et au parallèle passant par le point.

La représentation est conforme, par suite l'altération angulaire est nulle, l'indicatrice de Tissot est un cercle et le module linéaire ne dépend pas de la direction mais seulement du point et on a l'équivalence :

$$\boxed{\text{Altération angulaire nulle} \Leftrightarrow m_\varphi = m_\lambda \Leftrightarrow \forall \delta, m_\delta = m}$$

où  $\delta$  désigne 'la direction'.

## 12.3 Calcul des modules principaux

On commence par le calcul du module  $m_\varphi$ . Par définition :

$$m_\varphi = \frac{dS}{ds}$$

avec  $dS$  pris sur l'image de la méridienne et  $ds$  sur la méridienne du modèle, or  $ds = \rho d\varphi$  et  $dS = -dR$ , le signe - provient du fait que les déplacements infinitésimaux  $dR$  et  $d\varphi$  sont de signe contraire. On note par  $\rho$  le rayon de courbure, d'où :

$$\boxed{m_\varphi = \frac{dS}{ds} = \frac{-dR}{\rho d\varphi}}$$

Maintenant on calcule le module principal  $m_\lambda$ , on a :

$$m_\lambda = \frac{dS}{ds} = \frac{Rd\Omega}{rd\lambda}$$

avec  $r = N.\cos\varphi$  le rayon du parallèle de latitude  $\varphi$ .

#### 12.4 Etablissement des Formules $R(\varphi)$ et $\Omega(\lambda)$

Comme on a :

$$m_\lambda = m_\varphi$$

d'où :

$$\frac{Rd\Omega}{rd\lambda} = \frac{-dR}{\rho d\varphi} \implies \frac{d\Omega}{d\lambda} = \frac{-rdR}{\rho R d\varphi}$$

Le terme à gauche est une fonction de  $\lambda$  seulement car  $\Omega$  ne dépend que de  $\lambda$ , le terme à droite est fonction de  $\varphi$  seulement, donc l'égalité est toujours vérifiée que si les deux termes sont constants, on appelle  $n$  cette constante, d'où :

$$\begin{aligned} \frac{d\Omega}{d\lambda} &= n \\ \frac{-rdR}{\rho R d\varphi} &= n \end{aligned}$$

Par suite, en intégrant la première équation et prenant  $\Omega(\lambda_0) = 0$  avec  $\lambda_0$  la longitude du méridien origine, on obtient :

$$\Omega = n(\lambda - \lambda_0) \quad (12.1)$$

La deuxième équation différentielle s'écrit sous la forme :

$$\frac{dR}{R} = \frac{-n\rho d\varphi}{r} = \frac{-n\rho d\varphi}{N\cos\varphi} = -ndL \quad (12.2)$$

avec :

$$dL = \frac{\rho d\varphi}{N\cos\varphi} \quad (12.3)$$

La variable  $L$  appelée la latitude isométrique donnée par la formule :

$$L(\varphi) = \text{Logtg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - \frac{e}{2} \text{Log} \left( \frac{1 + e\sin\varphi}{1 - e\sin\varphi} \right) \quad (12.4)$$

En effet, calculant une primitive de  $\frac{\rho d\varphi}{N\cos\varphi}$  en considérant  $\varphi$  n'atteint pas les valeurs extrêmes  $\pm \frac{\pi}{2}$ , soit :

$$\begin{aligned} \int \frac{\rho d\varphi}{N \cos \varphi} &= \int \frac{(1-e^2)d\varphi}{\cos \varphi(1-e^2 \sin^2 \varphi)} = \int \frac{(1-e^2 \sin^2 \varphi - e^2 \cos^2 \varphi)d\varphi}{\cos \varphi(1-e^2 \sin^2 \varphi)} = \\ &= \int \frac{d\varphi}{\cos \varphi} - \int \frac{e^2 \cos \varphi d\varphi}{1-e^2 \sin^2 \varphi} = \text{Logtg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - e \int \frac{du}{1-u^2} = \\ &= \text{Logtg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - \frac{e}{2} \text{Log} \frac{1+u}{1-u} = \text{Logtg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - \frac{e}{2} \text{Log} \frac{1+e \sin \varphi}{1-e \sin \varphi} + C \end{aligned}$$

où on a fait le changement de variables suivant  $u = e \sin \varphi$  avec  $|u| < 1$ . Par suite en prenant l'intégrale entre la latitude origine  $\varphi = 0$  et la latitude  $\varphi$  et que  $L(0) = 0$ , on retrouve la formule donnée par (12.4) où  $e$  est la première excentricité de l'ellipsoïde de référence.

On revient à l'équation (12.2) :

$$\frac{dR}{R} = \frac{-n\rho d\varphi}{r} = \frac{-n\rho d\varphi}{N \cos \varphi} = -n dL$$

En posant :

$$L_0 = L(\varphi_0)$$

où  $\varphi_0$  est la latitude du parallèle origine, l'intégration de (12.2) donne :

$$\text{Log} \frac{R}{R_0} = -n(L - L_0) \implies \boxed{R = R_0 \exp(-n(L - L_0)) = R_0 e^{-n(L - L_0)}} \quad (12.5)$$

## 12.5 Détermination des Constantes $R_0$ et $n$

Pour déterminer les constantes  $R_0$  et  $n$ , on impose que le parallèle origine soit un isomètre automécoïque et stationnaire, c'est-à-dire :

$$\begin{aligned} m(\varphi_0) &= 1 \\ \text{et} \left( \frac{dm}{d\varphi} \right)_{\varphi=\varphi_0} &= 0 \end{aligned}$$

soit le module linéaire admet un minimum égal à  $m(\varphi_0)$ . Comme :

$$m = m_\varphi = m_\lambda = \frac{-dR}{\rho d\varphi}$$

et :

$$dR = -nR dL = -nR \frac{\rho d\varphi}{N \cos \varphi} \quad (12.6)$$

D'où l'expression du module linéaire :

$$m = \frac{nR}{N \cos \varphi} = \frac{nR_0 e^{-n(L-L_0)}}{N \cos \varphi} \quad (12.7)$$

Pour  $\varphi = \varphi_0$ , on a :

$$m(\varphi_0) = 1 = \frac{nR_0}{N_0 \cos \varphi_0} \Rightarrow \boxed{nR_0 = N_0 \cos \varphi_0} \quad (12.8)$$

on appelle :

$$r = N \cos \varphi$$

Le calcul de  $\frac{dr}{d\varphi}$  donne :

$$\frac{dr}{d\varphi} = N'_\varphi \cos \varphi - N \sin \varphi \quad (12.9)$$

comme :

$$N = a(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-1/2}$$

on obtient :

$$N'_\varphi = \frac{e^2 N \sin \varphi \cos \varphi}{1 - e^2 \sin^2 \varphi}$$

On a alors :

$$\frac{dr}{d\varphi} = \frac{e^2 N \sin \varphi \cos^2 \varphi}{1 - e^2 \sin^2 \varphi} - N \sin \varphi = N \sin \varphi \left( \frac{e^2 \cos^2 \varphi}{1 - e^2 \sin^2 \varphi} - 1 \right)$$

$$\frac{dr}{d\varphi} = \frac{-(1 - e^2) N \sin \varphi}{1 - e^2 \sin^2 \varphi}$$

Or :

$$\rho = \frac{(1 - e^2) N}{1 - e^2 \sin^2 \varphi}$$

Par suite :

$$\boxed{\frac{dr}{d\varphi} = -\rho \sin \varphi} \quad (12.10)$$

On revient à l'équation (12.7) :  $m = nR/r$  et en prenant sa différentielle logarithmique, d'où le résultat :

$$\frac{dm}{m} = \frac{dR}{R} - \frac{dr}{r}$$

En utilisant les équations (12.6) et (12.7), on obtient :

$$\frac{dm}{m} = \frac{-n\rho d\varphi}{r} + \frac{\rho \sin \varphi d\varphi}{r} = (n - \sin \varphi) \frac{\rho d\varphi}{r}$$

Soit :

$$\frac{dm}{d\varphi} = (n - \sin\varphi) \frac{m\rho}{r} \quad (12.11)$$

Et pour  $\varphi = \varphi_0$ , on a :

$$\frac{dm}{d\varphi} \Big|_{\varphi_0} = 0 \Rightarrow (n - \sin\varphi_0) \frac{m(\varphi_0)\rho_0}{r(\varphi_0)} = 0$$

D'où :

$$\boxed{n = \sin\varphi_0} \quad (12.12)$$

L'équation (12.8) s'écrit donc :

$$\boxed{R_0 = N(\varphi_0) \cotg\varphi_0 = N_0 \cotg\varphi_0} \quad (12.13)$$

d'où les équations de la représentation plane Lambert :

$$\boxed{\begin{aligned} \Omega &= (\lambda - \lambda_0) \sin\varphi_0 \\ R &= N_0 \cotg\varphi_0 e^{-\sin\varphi_0(L-L_0)} \end{aligned}} \quad (12.14)$$

avec :

$$L(\varphi) = \text{Logtg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - \frac{e}{2} \text{Log} \left( \frac{1 + e \sin\varphi}{1 - e \sin\varphi} \right)$$

L'expression du module linéaire est égale à :

$$\boxed{m(\varphi) = \frac{\sin\varphi_0 R(\varphi)}{N(\varphi) \cos\varphi}} \quad (12.15)$$

## 12.6 Expression des Coordonnées Cartésiennes

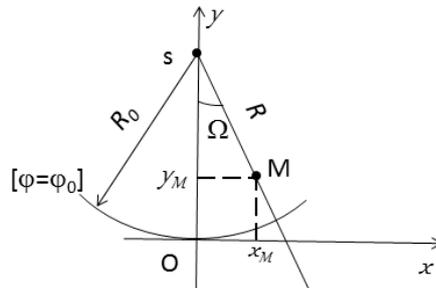
Dans ce paragraphe, on va décrire les coordonnées cartésiennes en fonction de  $(\Omega, R)$ . Soit un point  $M(\varphi, \lambda)$  ayant pour coordonnées polaires  $(\Omega, R)$ .

On considère un système d'axes  $(O, x, y)$  qu'on nomme repère origine, tel que l'axe  $Ox$  est la tangente à l'image du parallèle origine au point  $O$  dirigé vers l'Est et  $Oy$  est porté par l'image du méridien origine dirigé vers le Nord (**Fig. 12.3**). Soit le point  $S$  de  $Oy$  avec  $OS = R_0$ , on a alors :

$$x_M = R \sin\Omega$$

$$y_M = R_0 - R \cos \Omega$$

ou encore :



**Fig. 12.3** Le repère origine

$$\begin{cases} x_M = R \sin((\lambda - \lambda_0) \sin \varphi_0) \\ y_M = R_0 - R \cos((\lambda - \lambda_0) \sin \varphi_0) \end{cases} \quad (12.16)$$

avec  $\lambda$  comptée positivement à l'Est du méridien origine des longitudes.

### 12.7 Passage des Coordonnées $(R, \Omega)$ aux Coordonnées $(x, y)$

Ayant  $(\varphi, \lambda)$  et  $\varphi_0, \lambda_0$ , on calcule :

$$\begin{aligned} \Omega &= (\lambda - \lambda_0) \sin \varphi_0 \\ L(\varphi) &= \text{Logtg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - \frac{e}{2} \text{Log} \frac{1 + e \sin \varphi}{1 - e \sin \varphi} \\ R_0 &= N_0 \cotg \varphi_0 \\ R &= R_0 \exp(-\sin \varphi_0 (L - L_0)) \\ x &= R \sin \Omega \\ y &= R_0 - R \cos \Omega \end{aligned}$$

### 12.8 Passage des Coordonnées $(x, y)$ aux Coordonnées $(R, \Omega)$

On donne  $\varphi_0$  et  $\lambda_0$  et ayant  $(x, y)$ , on calcule :

$$\begin{aligned} R_0 &= N_0 \cotg \varphi_0 \\ R \cos \Omega &= R_0 - y \end{aligned}$$

Comme :

$$x = R \sin \Omega$$

d'où :

$$\tg \Omega = \frac{x}{R_0 - y}$$

Par suite :

$$\Omega = (\lambda - \lambda_0) \sin \varphi_0 = \text{Arctg} \left( \frac{x}{R_0 - y} \right)$$

D'où :

$$\boxed{\lambda = \lambda_0 + \frac{1}{\sin \varphi_0} \text{Arctg} \left( \frac{x}{R_0 - y} \right)} \quad (12.17)$$

De :

$$y = R_0 - R \cos \Omega$$

on obtient :

$$R = \frac{R_0 - y}{\cos \Omega}$$

Et de :

$$R = R_0 \exp(-\sin \varphi_0 (L - L_0)) \Rightarrow \text{Log} \frac{R}{R_0} = -\sin \varphi_0 (L - L_0)$$

d'où :

$$\boxed{L = L_0 + \frac{1}{\sin \varphi_0} \text{Log} \frac{R_0}{R}} \quad (12.18)$$

Le problème devient à calculer  $\varphi$  à partir de la donnée de la latitude isométrique  $L$ . Ce calcul se fait par itérations comme suit :

1. Ayant  $L$ , on calcule  $\varphi_1$  telle que  $L = \text{Logtg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_1}{2} \right)$ .
2. On calcule  $\varphi_2$  telle que  $L + \frac{e}{2} \text{Log} \left( \frac{1 + e \sin \varphi_1}{1 - e \sin \varphi_1} \right) = \text{Logtg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_2}{2} \right)$ .
3. On réitère le processus jusqu'à ce que  $|\varphi_{i+1} - \varphi_i| < \alpha$  où  $\alpha$  une petite quantité fixée à l'avance.

### 12.9 Etude de l'Altération Linéaire

L'altération linéaire est définie par :

$$\boxed{\epsilon = m - 1} \quad (12.19)$$

où  $m$  est le module linéaire. Le développement limité du module linéaire au voisinage de  $\varphi_0$  s'écrit :

$$m(\varphi) = m(\varphi_0) + (\varphi - \varphi_0) \left( \frac{dm}{d\varphi} \right)_{\varphi=\varphi_0} + \frac{(\varphi - \varphi_0)^2}{2} \left( \frac{d^2m}{d\varphi^2} \right)_{\varphi=\varphi_0} + o((\varphi - \varphi_0)^3)$$

Or :

$$m(\varphi_0) = 1 \text{ et } \left( \frac{dm}{d\varphi} \right)_{\varphi=\varphi_0} = 0$$

car le parallèle  $\varphi = \varphi_0$  est un isomètre automécoïque et stationnaire, d'où :

$$m(\varphi) = 1 + \frac{(\varphi - \varphi_0)^2}{2} \left( \frac{d^2m}{d\varphi^2} \right)_{\varphi=\varphi_0} + o((\varphi - \varphi_0)^3) \quad (12.20)$$

On est amené à calculer la valeur de la dérivée seconde de  $m$  pour  $\varphi = \varphi_0$ . Or l'équation (12.11) donne l'expression de  $m'_\varphi$ . On dérive  $m'_\varphi$ .

$$\frac{d^2m}{d\varphi^2} = \frac{dm'_\varphi}{d\varphi} = \frac{d}{d\varphi} \left[ \frac{m\rho}{r} (\sin\varphi - n) \right] = \frac{m\rho}{r} \cos\varphi + (\sin\varphi - n) \frac{d}{d\varphi} \left( \frac{m\rho}{r} \right) \quad (12.21)$$

d'où :

$$\left( \frac{d^2m}{d\varphi^2} \right)_{\varphi=\varphi_0} = \frac{\cos\varphi_0 m(\varphi_0) \rho(\varphi_0)}{r(\varphi_0)} = \frac{\rho_0}{N_0} \quad (12.22)$$

car  $n = \sin\varphi_0$  et  $m(\varphi_0) = 1$ . (12.20) devient :

$$m(\varphi) = 1 + \frac{(\varphi - \varphi_0)^2}{2} \frac{\rho_0}{N_0} + o((\varphi - \varphi_0)^3) = 1 + \frac{(\varphi - \varphi_0)^2}{2} \frac{\rho_0^2}{\rho_0 N_0} + o((\varphi - \varphi_0)^3)$$

En posant :

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0$$

on a alors :

$$\boxed{m(\varphi) = 1 + \frac{1}{2N_0\rho_0} (\rho_0\Delta\varphi)^2 + o(\Delta\varphi^3)} \quad (12.23)$$

Or  $\rho_0\Delta\varphi = \rho_0(\varphi - \varphi_0)$  la distance approchée du point  $M(\varphi, \lambda)$  au parallèle origine  $\varphi = \varphi_0$ , d'où l'expression de l'altération linéaire :

$$\epsilon = m - 1 = \frac{1}{2N_0\rho_0}(\rho_0\Delta\varphi)^2 = \frac{\ell^2}{2N_0\rho_0} \quad (12.24)$$

où  $\ell$  est la distance du point au parallèle origine.

### 10.9.1. Calculs numériques

On considère comme exemple numérique le cas de la représentation Lambert Nord Tunisie ayant comme parallèle origine  $\varphi_0 = 40.0\text{ gr}$  et l'ellipsoïde de référence est celui de Clarke Français 1880.

On a donc les valeurs numériques du module et l'altération linéaires comme suit :

$$\begin{aligned} m(\varphi_0) &= 1 \implies \epsilon = 0 \\ m(42.5\text{ gr}) &= 1.000775720 \implies \epsilon = 7.75720 \times 10^{-4} \\ m(37.5\text{ gr}) &= 1.000760827 \implies \epsilon = 7.60827 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

Soit une distance de  $1000\text{ m}$  sur le parallèle origine, elle se transforme à  $1000\text{ m}$  sans altération. Une distance de  $1000\text{ m}$  sur le parallèle  $\varphi = 42.5\text{ gr}$  devient une distance de  $1000.776\text{ m}$  sur le plan, de même une distance de  $1000\text{ m}$  sur le parallèle  $\varphi = 37.5\text{ gr}$  devient une distance de  $1000.761\text{ m}$  sur le plan.

Pour réduire les altérations linéaires, on multiplie le module linéaire par un coefficient  $k$  dit facteur de réduction de l'échelle. Le module linéaire devient alors :

$$m' = k.m = \frac{k \sin \varphi_0 R(\varphi)}{N(\varphi) \cos \varphi} \quad (12.25)$$

Par suite, les modules linéaires et les altérations correspondantes deviennent (Cas de la Tunisie, le facteur  $k = k_N$  est égal à  $0.999625544$ ) :

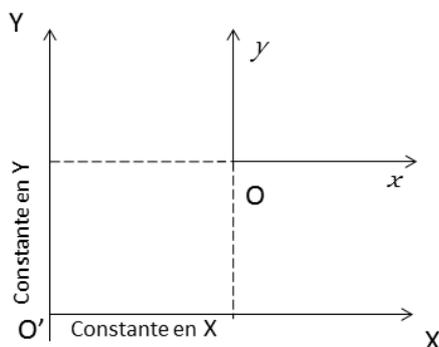
$$\begin{aligned} m'(\varphi_0) &= 0.999625544 \Rightarrow \epsilon = -0.000009460 \\ m'(42.5\text{ gr}) &= 1.000400974 \Rightarrow \epsilon = +0.400974 \times 10^{-3} \\ m'(37.5\text{ gr}) &= 1.000386086 \Rightarrow \epsilon = +0.386086 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

Sur le parallèle  $\varphi = 42.5\text{ gr}$ , l'altération linéaire pour  $1000\text{ m}$  a passé de  $+0.776\text{ m}$  à  $+0.401\text{ m}$ , d'où réduction des altérations.

Avec l'introduction du facteur de réduction de l'échelle, les formules (12.16) des coordonnées rectangulaires  $(x, y)$  s'écrivent :

$$\begin{cases} x_M = kR \sin((\lambda - \lambda_0) \sin \varphi_0) \\ y_M = k(R_0 - R \cos((\lambda - \lambda_0) \sin \varphi_0)) \end{cases} \quad (12.26)$$

Pour obtenir des coordonnées rectangulaires positives, on définit un repère  $(O', X, Y)$  tels que  $O'X$  et  $O'Y$  soient dirigés respectivement vers l'Est et le Nord (**Fig. 12.4**) et que :



**Fig. 12.4** Le repère  $(O', X, Y)$

$$\begin{cases} X = \text{Constante } X + x_M \\ Y = \text{Constante } Y + y_M \end{cases} \quad (12.27)$$

Les quantités *Constante X* et *Constante Y* sont respectivement les constantes de translation en  $X$  (*Est*) et en  $Y$  (*Nord*) exprimées en mètres.

### 12.10 Convergence des méridiens

Pour passer de l'azimut géodésique sur le modèle ellipsoïdique de la direction  $m_1 m_2$  au gisement  $M_1 M_2$  sur le plan de la représentation, on a la formule algébrique :

$$G = Az - \gamma + Dv \quad (12.28)$$

avec  $\gamma$  le gisement de l'image du méridien avec son signe positif ou négatif. Or l'image d'un méridien est une droite qui coupe l'axe Ox (du nord) sous l'angle  $\Omega = (\lambda - \lambda_0) \sin \varphi_0$ , par suite :

$$\boxed{\gamma = \Omega = (\lambda - \lambda_0) \sin \varphi_0 = \text{convergence des méridiens}} \quad (12.29)$$

## 12.11 Calcul de la réduction de la corde

Sur le terrain, on observe une direction  $AB$ , la visée  $AB$  est très voisine de la géodésique  $AB$ . Sa transformée sur le plan de la représentation n'est pas une droite, mais une courbe tournant sa concavité vers l'image du parallèle origine.

On observe la direction  $AB$  c'est-à-dire l'arc  $ab$ . Pour passer de l'arc  $ab$  à la corde  $\overline{ab}$ , on apporte une correction à la lecture de la direction  $AB$  ou  $\overline{ab}$ . Cette correction est appelée la correction de réduction à la corde. Elle est donnée par la formule :

$$\boxed{Dv = \frac{S}{2} \Gamma \left( \frac{S}{3} \right)} \quad (12.30)$$

où  $S$  représente la longueur  $AB$ ,  $\Gamma \left( \frac{S}{3} \right)$  est la courbure de la transformée de la géodésique  $AB$  prise au  $1/3$  de la distance de  $A$  vers  $B$ .

En utilisant la formule de Schols-Laborde<sup>1</sup> donnant la courbure de la transformée d'une géodésique, on démontre que :

$$\boxed{Dv^{(dmgr)} = K \cdot d\lambda} \quad (12.31)$$

avec  $d\lambda =$  la différence de longitude en  $km$  des 2 extrémités de la visée  $AB$  et  $K$  vaut :

$$\boxed{K = \frac{1}{2} \frac{(R_0 - R)_{1/3}}{N(\varphi_0) \rho(\varphi_0) \sin 1''}} \quad (12.32)$$

où  $(R_0 - R)$ ,  $N(\varphi_0)$  et  $\rho(\varphi_0)$  en  $km$ .

---

1. **Jean Laborde** : colonel de l'armée française et géodésien cartographe. Il a défini la représentation plane qui porte son nom (représentation conforme cylindrique oblique). Celle-ci a été appliquée pour le Madagascar.

### 12.12 Exercices et Problèmes

**Exercice 12.1** En un point  $A$  de coordonnées géodésiques  $\varphi = 40.9193\text{gr}$  et  $\lambda = 11.9656\text{gr}$  à l'Est de Greenwich, on vise un point  $B$ .

1. Calculer les coordonnées planes Lambert du point  $A$ , sachant que  $\varphi_0 = 40.00\text{gr}$  et  $\lambda_0 = +11.00\text{gr}$ .
2. L'azimut géodésique de la direction  $AB$  est  $Az_g = 55.7631\text{gr}$ . Sachant que  $Dv = 1.52\text{dmgr}$ , calculer  $G$  le gisement de la direction  $AB$ .
3. La distance  $AB$  réduite à l'ellipsoïde de référence est  $D_e = 5421.32\text{m}$ . Sachant que l'altération linéaire dans la région des points  $A$  et  $B$  vaut  $-9\text{cm/km}$ , calculer la distance  $AB$  réduite au plan.

**Exercice 12.2** D'après les coordonnées de deux points  $A$  et  $B$  vous trouvez la distance  $AB = 5427.380\text{m}$ . Sachant que :

- a - l'altération linéaire de la représentation dans la région de  $AB$  vaut  $+8.10^{-5}$  ;
- b - les altitudes des points  $A$  et  $B$  sont :  $H_A = 1000.00\text{m}$  et  $H_B = 1200.00\text{m}$ . Calculer la distance suivant la pente  $D_P$  entre les points  $A$  et  $B$  matérialisés sur le terrain.

**Problème 12.1** On désire étudier les variations du module linéaire  $m$  de la représentation Lambert tangente en fonction de la latitude  $\varphi \in [0, +\frac{\pi}{2}]$ .

1. Donner l'expression de  $m(\varphi)$ .
2. Montrer que  $m(0)$  est une quantité finie positive que l'on calculera.
3. Montrer que pour  $\varphi = +\frac{\pi}{2}$ ,  $m$  devient une forme indéterminée qu'on précisera.
4. On pose  $\varphi = \frac{\pi}{2} - \theta$  et  $m(\varphi) = M(\theta)$ . Donner l'expression de  $M(\theta)$ .
5. Montrer qu'on peut écrire  $M(\theta) = A(\theta) \cdot u$  où  $A$  est une fonction de  $\theta$  prenant une valeur finie positive non nulle quand  $\theta \rightarrow 0^+$  et  $u$  donnée par :

$$u = \frac{\exp\left(\sin\varphi_0 \text{Log}tg\frac{\theta}{2}\right)}{\sin\theta}$$

avec  $\varphi_0$  la latitude du parallèle origine.

6. On pose  $t = tg\frac{\theta}{2}$ . Montrer que  $u$  s'écrit :

$$u = \frac{1+t^2}{2t^{1-\sin\varphi_0}}$$

et que  $\lim_{t \rightarrow 0^+} u = +\infty$ .

7. En déduire la limite de  $m(\varphi)$  quand  $\varphi \rightarrow \frac{\pi}{2}^-$ .

8. Donner l'expression de  $\frac{dm}{d\varphi}$  et présenter le tableau de variation de  $m(\varphi)$  pour le cas où  $\varphi_0 = +40 \text{ gr}$ .

**Problème 12.2** On a mesuré une distance suivant la pente  $D_P = 20130.858 \text{ m}$  entre deux points  $A$  et  $B$  avec  $H_A = 235.07 \text{ m}$ ,  $H_B = 507.75 \text{ m}$ , on prendra comme rayon terrestre  $R = 6378 \text{ km}$ .

1. Calculer la distance  $D_e$  suivant l'ellipsoïde en utilisant la formule rigoureuse.
2. Sachant que le module linéaire  $m$  vaut  $0.999850371$ , calculer la distance  $D_r$  réduite au plan de la représentation plane utilisée.
3. Les coordonnées géodésiques du point  $A$  sont :  $\varphi = 10.72453 \text{ gr}$ ,  $\lambda = 41.44903 \text{ gr}$ . Par des observations astronomiques, on a déterminé les coordonnées astronomiques  $\varphi_a = 10.72574 \text{ gr}$  et  $\lambda_a = 41.45052 \text{ gr}$  du point  $A$  et l'azimut astronomique de la direction  $AB$  soit  $Aza = 89.68499 \text{ gr}$ . Transformer l'azimut astronomique de la direction  $AB$  en azimut géodésique en utilisant l'équation de Laplace donnée par :

$$Azg = Aza + (\lambda - \lambda_a) \cdot \sin\varphi$$

4. Calculer le gisement  $G$  de la direction  $AB$  sachant que  $\varphi_0 = 40.00 \text{ gr}$ ,  $\lambda_0 = +11.00 \text{ gr}$  et la correction de la corde  $Dv = 0.00188 \text{ gr}$ .
5. Les coordonnées Lambert de  $A$  sont  $X_A = 478022.43 \text{ m}$  et  $Y_B = 444702.22 \text{ m}$ . Déterminer alors les coordonnées Lambert de  $B$ .
6. Calculer l'azimut de  $B$  vers  $A$  sachant qu'on néglige la correction de la corde de la direction  $BA$  et que  $\lambda_B = 10.92884 \text{ gr}$ .

**Problème 12.3** On a mesuré une distance suivant la pente entre les points  $A(H_A = 1319.79 \text{ m})$  et  $B(H_B = 1025.34 \text{ m})$  avec  $D_P = 16483.873 \text{ m}$ .

1. Calculer la distance  $D_e$  distance réduite à l'ellipsoïde de référence par la formule rigoureuse, on prendra le rayon de la Terre  $R = 6378 \text{ km}$ .
2. Calculer la distance  $D_r$  réduite à la représentation plane Lambert si l'altération linéaire de la zone est de  $-14 \text{ cm/km}$ .

3. La direction  $AB$  a un azimut géodésique  $Azg = 297.56225\text{ gr}$ . Donner l'expression du gisement  $G$  de  $AB$  en fonction de  $Azg, \gamma$  la convergence des méridiens et  $Dv$  la correction de la corde, sachant que la représentation plane Lambert utilisée a comme  $\varphi_0 = 37\text{ gr}, \lambda_0 = +11.00\text{ gr}$  que le point  $A$  est au nord du parallèle origine.

4. On donne  $Dv = -13.7\text{ dmgr}$  et  $\lambda = 9.3474734\text{ gr}$  la longitude de  $A$ , calculer  $G$ .

5. En déduire les coordonnées  $(X_B, Y_B)$  de  $B$  si  $X_A = 363044.79\text{ m}$  et  $Y_A = 407020.09\text{ m}$ .

6. Déterminer les coordonnées géographiques  $(\varphi, \lambda)$  de  $B$ .

On rappelle que :  $a = 6378249.20\text{ m}$  et  $e^2 = 0.0068034877$ .

# Chapitre 13

## *La Représentation Plane UTM*

### 13.1 Définition et Propriétés

La représentation plane UTM (Universal Transverse Mercator) est l'une des représentations la plus utilisée dans le monde.

C'est une représentation :

- conforme d'un modèle ellipsoïdique,
- transverse : c'est-à-dire l'image de l'équateur (en partie) est l'axe  $Ox$  (vers l'Est) et l'image d'un méridien appelé méridien central, de longitude  $\lambda_0$  qu'on suppose égale à 0, est l'axe  $Oy$  (vers le Nord) du plan.

Les coordonnées rectangulaires d'un point sont des fonctions de la forme :

$$\begin{cases} X = X(\varphi, \lambda) \\ Y = Y(\varphi, \lambda) \end{cases} \quad (13.1)$$

où  $(\varphi, \lambda)$  sont les coordonnées du point sur le modèle ellipsoïdique.

Soit un point  $M(\varphi, 0)$  sur le méridien origine, alors les coordonnées de  $m$  son image sur le plan sont :

$$\begin{aligned} X(\varphi, 0) &= 0 \\ Y(\varphi, 0) &= Y(\varphi) \end{aligned}$$

$Y(\varphi)$  sera déterminée en imposant que le long du méridien central ou origine, les longueurs sont conservées. Sur le méridien, la longueur est donnée par :

$$\boxed{\beta(\varphi) = \int_0^\varphi \rho ds} \quad (13.2)$$

d'où :

$$\beta(\varphi) = Y(\varphi) = Y(\varphi, 0)$$

## 13.2 Détermination des coordonnées UTM

### 11.2.1. Calcul Direct

Sur l'ellipsoïde, on a :

$$ds^2 = \rho^2 d\varphi^2 + N^2 \cos^2 \varphi d\lambda^2$$

le carré de l'élément de longueur infinitésimale, avec :

$$N(\varphi) = a(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-1/2}$$

$$\rho(\varphi) = a(1 - e^2)(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-3/2}$$

respectivement les rayons de courbure de la grande normale et de la méridienne,  $a$  le demi-grand axe et  $e$  la première excentricité de l'ellipsoïde de référence. On peut écrire que :

$$ds^2 = N^2 \cos^2 \varphi \left( \frac{\rho^2 d\varphi^2}{N^2 \cos^2 \varphi} + d\lambda^2 \right)$$

En posant :

$$\begin{aligned} dL &= \frac{\rho d\varphi}{N \cos \varphi} \\ \text{ou } L &= \text{Logtg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) - \frac{e}{2} \text{Log} \frac{1 + e \sin \varphi}{1 - e \sin \varphi} \end{aligned} \quad (13.3)$$

avec  $L$  la latitude isométrique, on a alors les coordonnées  $(L, \lambda)$  symétriques et orthogonales. L'expression de  $ds^2$  est égale à :

$$\boxed{ds^2 = N^2 \cos^2 \varphi (dL^2 + d\lambda^2)} \quad (13.4)$$

Sur le plan, on a :

$$dS^2 = dX^2 + dY^2$$

On pose :

$$\begin{aligned} z &= L + i\lambda \\ Z &= Y + iX \end{aligned} \quad (13.5)$$

où  $i$  désigne le nombre complexe tel que  $i^2 = -1$ . Entre  $z$  et  $Z$ , on a la relation :

$$Z = Y + iX = f(z) = f(L + i\lambda) \quad (13.6)$$

où  $f$  est une fonction à déterminer. La représentation étant conforme, la fonction  $f$  est par suite une fonction analytique dans  $\mathbf{C}$  (l'ensemble des nombres complexes). La fonction  $f$  est dérivable à tout ordre et développable en séries en tout point complexe. Considérons le point  $z_0$  tel que  $z_0 = L + i0 = L$  et  $z = L + i\lambda$ , ce qui donne  $z - z_0 = i\lambda$ .

Dans la représentation UTM, on restreint  $\lambda$  à varier dans l'intervalle  $[-3^\circ, +3^\circ]$ . Cet intervalle définit un fuseau de méridien central  $\lambda_0 = 0^\circ$  et d'amplitude  $6^\circ$ . Ainsi, la Terre est divisé en  $360^\circ/6^\circ = 60$  fuseaux qu'on numérote de 1 à 60 ce qui explique l'utilisation mondialement de la représentation UTM. Une interprétation géométrique de la représentation UTM est comme suit :

- on considère un cylindre ayant une base elliptique, tangent à l'ellipsoïde modèle le long de la méridienne de longitude  $\lambda = \lambda_0 = 0^\circ$ . A un point  $M(\varphi, \lambda)$  appartenant au fuseau  $[-3^\circ, +3^\circ]$  on lui fait correspondre un point  $m$  du cylindre (**Fig. 13.1**).

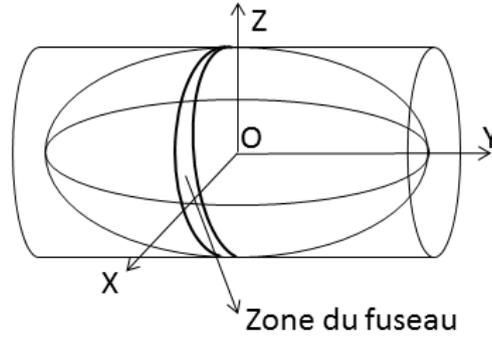
- après développement du cylindre sur le plan, on obtient l'image  $m(X, Y)$ .

On revient maintenant au développement de la fonction  $f$  au voisinage de  $z_0$ , on a l'expression :

$$f(z) = f(z_0) + (z - z_0)f'(z_0) + \frac{(z - z_0)^2}{2!}f''(z_0) + \dots + \frac{(z - z_0)^n}{n!}f^{(n)}(z_0) + \dots \quad (13.7)$$

On se limite à  $n = 8$ . D'où :

$$Y + iX = f(L) + i\lambda f'(L) - \frac{1}{2!}\lambda^2 f''(L) - i\frac{1}{3!}\lambda^3 f'''(L) + \frac{1}{4!}\lambda^4 f^{(4)}(L)$$



**Fig. 13.1** Interprétation géométrique de l'UTM

$$+i\frac{1}{5!}\lambda^5 f^{(5)}(L) - \frac{1}{6!}\lambda^6 f^{(6)}(L) - i\frac{1}{7!}\lambda^7 f^{(7)}(L) + \frac{1}{8!}\lambda^8 f^{(8)}(L) + \dots$$

Pour  $\lambda = 0$ , on a  $Y + iX = f(L)$  soit :

$$Y = f(L) = Y(\varphi, 0) = \beta(\varphi)$$

On pose :

$$\begin{aligned} a_0 &= f(L) = \beta(\varphi) \\ a_n &= \frac{1}{n!} f^{(n)}(L) = \frac{1}{n!} \frac{d^n \beta(\varphi)}{dL^n} \end{aligned} \quad (13.8)$$

Ce qui donne :

$$Y + iX = a_0 + ia_1\lambda - a_2\lambda^2 - ia_3\lambda^3 + a_4\lambda^4 + ia_5\lambda^5 - a_6\lambda^6 - ia_7\lambda^7 + a_8\lambda^8 + \dots$$

D'où :

$$\begin{cases} X = a_1\lambda - a_3\lambda^3 + a_5\lambda^5 - a_7\lambda^7 + \dots \\ Y = \beta(\varphi) - a_2\lambda^2 + a_4\lambda^4 - a_6\lambda^6 + a_8\lambda^8 + \dots \end{cases} \quad (13.9)$$

avec :

$$a_0 = f(L) = \beta(\varphi), \quad a_1 = f'(L) = \frac{d\beta}{dL} = \frac{d\beta}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dL}$$

En posant :

$$\eta^2 = e'^2 \cos^2 \varphi, \quad e'^2 = \frac{e^2}{1 - e^2}, \quad t = \operatorname{tg} \varphi$$

avec  $e'$  la deuxième excentricité, on obtient les coefficients :

$$\begin{aligned}
a_1 &= N \cos \varphi \\
a_2 &= -\frac{1}{2} N \cos \varphi \sin \varphi \\
a_3 &= -\frac{1}{6} N \cos^3 \varphi (1 + \eta^2 - t^2) \\
a_4 &= \frac{1}{24} N \cos^3 \varphi \sin \varphi (5 - t^2 + 9\eta^2 + 4\eta^4) \\
a_5 &= \frac{1}{120} N \cos^5 \varphi (5 - 18t^2 + t^4 + 14\eta^2 - 58\eta^2 t^2 + 13\eta^4) \\
a_6 &= -\frac{1}{720} N \cos^5 \varphi \sin \varphi (61 - 58t^2 + t^4 + 270\eta^2 - 330t^2 \eta^2 + 200\eta^4 - 232t^2 \eta^4) \\
a_7 &= -\frac{1}{5040} N \cos^7 \varphi (61 + 131t^2 + 179t^4 + 331\eta^2 - 3298t^2 \eta^2) \\
a_8 &= \frac{1}{40320} N \cos^7 \varphi \sin \varphi (165 - 61t^2 + 537t^4 + 9679\eta^2 - 23278t^2 \eta^2 + 9244\eta^4 + \\
&\quad 358t^4 \eta^2 - 19788t^2 \eta^4)
\end{aligned}
\tag{13.10}$$

Le calcul de  $\beta(\varphi) = f(L) = \beta$  se calcule à partir du développement de  $\beta(\varphi)$  en fonction de  $u = e^2 \sin^2(\varphi)$  car  $u < 1$ . On exprime  $\sin^m \varphi$  en fonction de  $\sin$  de multiples de  $\varphi$  soit  $\sin p\varphi$ . En intégrant, on arrive à (voir en Annexe du présent chapitre) :

$$\begin{aligned}
\beta(\varphi) &= a(1 - e^2) \cdot (C_0 \varphi + C_2 \sin 2\varphi + C_4 \sin 4\varphi + C_6 \sin 6\varphi \\
&\quad + C_8 \sin 8\varphi + C_{10} \sin 10\varphi + C_{12} \sin 12\varphi)
\end{aligned}
\tag{13.11}$$

avec :

$$\begin{aligned}
C_0 &= 1 + \frac{3}{4}e^2 + \frac{45}{64}e^4 + \frac{175}{256}e^6 + \frac{11025}{16384}e^8 + \frac{43659}{65536}e^{10} + \frac{693693}{1048576}e^{12} \\
C_2 &= -\frac{3}{8}e^2 - \frac{15}{32}e^4 - \frac{525}{1024}e^6 - \frac{2205}{4096}e^8 - \frac{72765}{131072}e^{10} - \frac{297297}{524288}e^{12} \\
C_4 &= \frac{15}{256}e^4 + \frac{105}{1024}e^6 + \frac{2205}{16384}e^8 + \frac{10395}{65536}e^{10} + \frac{1486485}{8388608}e^{12}
\end{aligned}
\tag{13.12}$$

$$\begin{aligned}
C_6 &= -\frac{35}{3072}e^6 - \frac{315}{12288}e^8 - \frac{31185}{786432}e^{10} - \frac{165165}{3145728}e^{12} \\
C_8 &= \frac{315}{131072}e^8 + \frac{3465}{524288}e^{10} + \frac{99099}{8388608}e^{12} \\
C_{10} &= -\frac{693}{1310720}e^{10} - \frac{9009}{5242880}e^{12} \\
C_{12} &= \frac{1001}{8388608}e^{12}
\end{aligned} \tag{13.13}$$

On pose :

$$\Lambda = \lambda - \lambda_0 \tag{13.14}$$

alors les formules définitives du calcul direct sont en s'arrêtant à l'ordre 8 :

$$\begin{aligned}
X &= a_1\Lambda - a_3\Lambda^3 + a_5\Lambda^5 - a_7\Lambda^7 \\
Y &= \beta(\varphi) - a_2\Lambda^2 + a_4\Lambda^4 - a_6\Lambda^6 + a_8\Lambda^8
\end{aligned} \tag{13.15}$$

En général, on applique à  $X, Y$  un facteur de réduction  $k = 0.9996$  et une constante de translation en  $X$  de  $500000m$ , les coordonnées obtenues sont :

$$\begin{aligned}
X' &= k.X + 500000.00m \\
Y' &= k.Y
\end{aligned} \tag{13.16}$$

### 11.2.2. Calcul Inverse

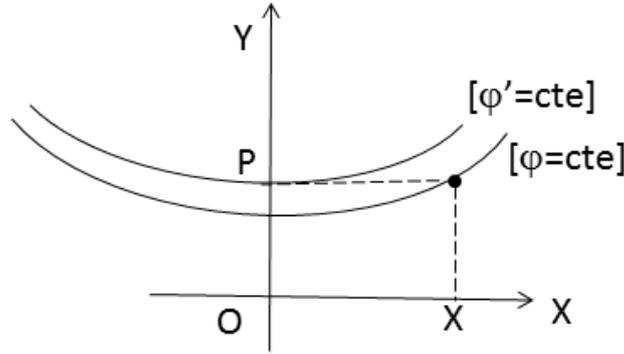
Ayant les coordonnées  $(X', Y')$  en UTM et la longitude  $\lambda_0$  du méridien central, comment on calcule  $(\varphi, \lambda)$ . On commence en revenant à :

$$\begin{aligned}
X &= (X' - 500000)/k \\
Y &= Y'/k
\end{aligned} \tag{13.17}$$

Par suite, en utilisant les variables :  $z = L + i(\lambda - \lambda_0)$  et  $Z = Y + iX$ , on cherche à déterminer une fonction analytique  $g$  telle que :

$$\begin{aligned}
z &= g(Z) \\
\text{ou } L + i(\lambda - \lambda_0) &= g(Y + iX)
\end{aligned} \tag{13.18}$$

Pour cela, on considère sur l'axe  $OY$  le point  $P(0, Y)$  (**Fig. 13.2**), il lui correspond l'affixe  $Z_0 = Y$ , sur l'ellipsoïde il est l'image de  $L' = L'(\varphi') = g(Z_0)$ . D'où le développement de  $g$  au point  $Z_0$  :



**Fig. 13.2** Passage de  $(X, Y)$  à  $(\varphi, \lambda)$

$$g(Z) = g(Z_0) + (Z - Z_0)g'(Z_0) + \frac{(Z - Z_0)^2}{2!}g''(Z_0) + \dots + \frac{(Z - Z_0)^n}{n!}g^{(n)}(Z_0) + \dots$$

Or :  $Z - Z_0 = Y + iX - Y = iX$  ce qui donne :

$$\begin{aligned} L + i(\lambda - \lambda_0) &= g(Z_0) + iXg'(Y) - \frac{1}{2}X^2 \cdot g''(Y) - \frac{1}{3!}iX^3g^{(3)}(Y) \\ &+ \frac{1}{4!}X^4g^{(4)}(Y) + \frac{1}{5!}iX^5g^{(5)}(Y) - \frac{1}{6!}X^6g^{(6)}(Y) + \dots \end{aligned}$$

On pose :

$$b_0 = g(Z_0) = g(Y) = L', \quad b_n = \frac{g^{(n)}(Y)}{n!} = \frac{1}{n!} \frac{d^n L'}{dY^n} = \frac{1}{n!} \frac{d^n L'}{d\beta^n}$$

d'où :

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda_0 + b_1 X - b_3 X^3 + b_5 X^5 - b_7 X^7 + \dots \\ L(\varphi) &= L = L'(\varphi') - b_2 X^2 + b_4 X^4 - b_6 X^6 + b_8 X^8 + \dots \end{aligned} \quad (13.19)$$

avec :

$$b_0 = g(Z_0) = L', \quad b_1 = g'(Y) = \frac{dL'}{dY} = \frac{dL'}{d\beta} = \frac{dL'}{d\varphi'} \cdot \frac{d\varphi'}{d\beta}$$

En posant  $\eta'^2 = e'^2 \cos^2 \varphi'$  avec  $e'$  la deuxième excentricité  $e'^2 = e^2 / (1 - e^2)$ ,  $t' = \operatorname{tg} \varphi'$  et  $N' = N(\varphi')$ , on obtient les coefficients :

$$\begin{aligned}
b_1 &= \frac{1}{N' \cos \varphi'} \\
b_2 &= \frac{tg \varphi'}{2N'^2 \cos \varphi'} \\
b_3 &= \frac{(1 + 2t'^2 + \eta'^2)}{6N'^3 \cos \varphi'} \\
b_4 &= \frac{tg \varphi' (5 + 6t'^2 + \eta'^2 - 4\eta'^4)}{24N'^4 \cos \varphi'} \\
b_5 &= \frac{(5 + 28t'^2 + 6\eta'^2 + 24t'^4 + 8\eta'^2 t'^2)}{120N'^5 \cos \varphi'} \\
b_6 &= \frac{tg \varphi' (61 + 180t'^2 + 46\eta'^2 + 120t'^4 + 48\eta'^2 t'^2)}{720N'^6 \cos \varphi'} \\
b_7 &= \frac{(61 + 622t'^2 + 107\eta'^2 + 1320t'^4 + 1538\eta'^2 t'^2 + 46\eta'^4)}{5040N'^7 \cos \varphi'}
\end{aligned} \tag{13.20}$$

Ayant  $L(\varphi)$ , on calcule  $\varphi$  en utilisant la formule :

$$L = \text{Log} \text{tg} \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - \frac{e}{2} \text{Log} \left( \frac{1 + e \sin \varphi}{1 - e \sin \varphi} \right)$$

Le calcul se fait par itérations.

### 11.2.3. Le Module linéaire

Le module linéaire  $m$  est tel que :

$$m^2 = \left( \frac{dS}{ds} \right)^2 = \frac{dS^2}{ds^2} = \frac{dX^2 + dY^2}{\rho^2 d\varphi^2 + N^2 \cos^2 \varphi d\lambda^2} \tag{13.21}$$

La représentation étant conforme, alors le module linéaire est indépendant de la direction, mais ne dépend que du point, on choisit de calculer  $m$  le long des parallèles, soit  $d\varphi = 0$ , ce qui donne :

$$m^2 = \frac{dX^2 + dY^2}{N^2 \cos^2 \varphi d\lambda^2}$$

Comme on a :

$$X = a_1\lambda - a_3\lambda^3 + a_5\lambda^5 + \dots$$

$$Y = \beta(\varphi) - a_2\lambda^2 + a_4\lambda^4 + \dots$$

et que les coefficients  $a_i$  sont des fonctions seulement de la latitude ( $\varphi$ ), d'où :

$$dX = a_1d\lambda - 3a_3\lambda^2d\lambda + 5a_5\lambda^4d\lambda = (a_1 - 3a_3\lambda^2 + 5a_5\lambda^4)d\lambda + \dots$$

et :

$$dY = -2a_2\lambda d\lambda + 4a_4\lambda^3d\lambda + \dots$$

En gardant les termes en  $\lambda$  et  $\lambda^2$ , on obtient :

$$dX = N\cos\varphi[1 + (\lambda^2/2)\cos^2\varphi(1 - tg^2\varphi + \eta^2)]d\lambda$$

et :

$$dY = \lambda N\cos^2\varphi tg\varphi d\lambda$$

Par suite :

$$dX^2 + dY^2 = N^2\cos^2\varphi((1 + (\lambda^2/2)\cos^2\varphi(1 - tg^2\varphi + \eta^2))^2 + \lambda^2\sin^2\varphi)d\lambda^2$$

En simplifiant et en négligeant les termes en  $\lambda^4$ , on trouve :

$$m = \sqrt{1 + \lambda^2(1 + \eta^2)\cos^2\varphi} \quad (13.22)$$

Au lieu de prendre  $m$  comme module linéaire, on le multiplie par un facteur  $k$  appelé facteur de réduction de l'échelle généralement égal à 0.9996. Le module linéaire devient :

$$m' = k\sqrt{1 + \lambda^2(1 + \eta^2)\cos^2\varphi} \quad (13.23)$$

On remplace  $\lambda$  par  $\lambda - \lambda_0$ , on trouve la formule du module linéaire :

$$\boxed{m' = k\sqrt{1 + (\lambda - \lambda_0)^2(1 + e'^2\cos^2\varphi)\cos^2\varphi}} \quad (13.24)$$

#### 11.2.4. Convergence des méridiens

Le gisement de l'image du méridien appelé 'convergence des méridiens' et noté par  $\gamma$  en un point  $(\varphi, \lambda)$  est donné en première approximation par la formule :

$$\boxed{tg\gamma = (\lambda - \lambda_0)\sin\varphi} \quad (13.25)$$

$\gamma$  est comptée dans le sens des gisements.

### 13.3 Annexe : Calcul de la longueur d'un arc de la méridienne d'un ellipsoïde de révolution

Soit  $(E)$  un ellipsoïde de révolution défini par ses paramètres :

$a$  : le demi-grand axe,

$e$  : la première excentricité.

L'expression de la longueur de la méridienne entre l'équateur et un point  $M$  de latitude géodésique  $\varphi$  est donnée par :

$$\beta = \beta(\varphi) = \int_0^\varphi \rho(u) du \quad (13.26)$$

avec :

$$\rho = \rho(u) = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 u)^{\frac{3}{2}}}$$

$\rho$  est le rayon de courbure de la méridienne.

L'intégrale (13.26) est une intégrale, dite elliptique, n'est pas exprimée par une formule finie. Pour la calculer, on fait l'usage d'un développement limité de l'expression  $(1-e^2 \sin^2 u)^{-\frac{3}{2}}$ .

On utilise la formule :

$$(1+x)^q = 1 + qx + \frac{q(q-1)}{2!}x^2 + \frac{q(q-1)(q-2)}{3!}x^3 + \dots + \frac{q(q-1)\dots(q-1+p)}{p!}x^p + o(x^{p+1})$$

avec  $|x| < 1$ ,  $q$  est un rationnel et  $p!$  désigne factoriel  $p$  soit  $p(p-1)\dots 3.2.1$ .

Comme  $|e^2 \sin^2 u| < 1$ , on a donc à l'ordre 12 :

$$\begin{aligned} \frac{1}{(1-e^2 \sin^2 u)^{\frac{3}{2}}} &= (1-e^2 \sin^2 u)^{-\frac{3}{2}} = 1 + \frac{3}{2}e^2 \sin^2 u + \frac{15}{8}e^4 \sin^4 u + \\ &\frac{35}{16}e^6 \sin^6 u + \frac{315}{128}e^8 \sin^8 u + \frac{693}{256}e^{10} \sin^{10} u + \frac{3003}{1024}e^{12} \sin^{12} u \quad (13.27) \end{aligned}$$

Pour pouvoir calculer les intégrales du type :

$$\int_0^\varphi \sin^p u du$$

on va exprimer les termes  $\sin^p u$  en fonction des lignes trigonométriques multiples de l'argument  $u$ . Ce qui donne :

$$\begin{aligned} \sin^2 u &= \frac{1}{2} - \frac{\cos 2u}{2} \\ \sin^4 u &= \frac{3}{8} - \frac{\cos 2u}{2} + \frac{\cos 4u}{8} \\ \sin^6 u &= \frac{5}{16} - \frac{15\cos 2u}{32} + \frac{13\cos 4u}{16} - \frac{\cos 6u}{32} \\ \sin^8 u &= \frac{35}{128} - \frac{17\cos 2u}{16} + \frac{7\cos 4u}{32} - \frac{\cos 6u}{16} + \frac{\cos 8u}{128} \\ \sin^{10} u &= \frac{63}{256} - \frac{105\cos 2u}{256} + \frac{15\cos 4u}{64} - \frac{45\cos 6u}{512} + \frac{5\cos 8u}{256} - \frac{\cos 10u}{512} \\ \sin^{12} u &= \frac{231}{1024} - \frac{99\cos 2u}{256} + \frac{495\cos 4u}{2048} - \frac{55\cos 6u}{512} + \frac{33\cos 8u}{1024} - \frac{3\cos 10u}{512} + \frac{\cos 12u}{2048} \end{aligned} \quad (13.28)$$

L'équation (13.27) s'écrit en utilisant les expressions de droite de (13.28) :

$$(1 - e^2 \sin^2 u)^{-\frac{3}{2}} = A_0 + A_2 \cos 2u + A_4 \cos 4u + A_8 \cos 8u + A_{10} \cos 10u + A_{12} \cos 12u \quad (13.29)$$

En intégrant (13.29) entre 0 et  $\varphi$  et après multiplication par le coefficient  $a(1 - e^2)$ , on trouve l'expression ci-dessous de la longueur de la méridienne :

$$\begin{aligned} \beta(\varphi) &= a(1 - e^2) \cdot (C_0 \varphi + C_2 \sin 2\varphi + C_4 \sin 4\varphi + C_6 \sin 6\varphi \\ &\quad + C_8 \sin 8\varphi + C_{10} \sin 10\varphi + C_{12} \sin 12\varphi) \end{aligned} \quad (13.30)$$

où les coefficient  $A_k$  vérifient :

$$\begin{aligned} C_0 &= A_0 & C_2 &= \frac{A_2}{2} & C_4 &= \frac{A_4}{4} & C_6 &= \frac{A_6}{6} \\ C_8 &= \frac{A_8}{8} & C_{10} &= \frac{A_{10}}{10} & C_{12} &= \frac{A_{12}}{12} \end{aligned} \quad (13.31)$$

avec :

$$\begin{aligned}
 C_0 &= 1 + \frac{3}{4}e^2 + \frac{45}{64}e^4 + \frac{175}{256}e^6 + \frac{11025}{16384}e^8 + \frac{43659}{65536}e^{10} + \frac{693693}{1048576}e^{12} \\
 C_2 &= -\frac{3}{8}e^2 - \frac{15}{32}e^4 - \frac{525}{1024}e^6 - \frac{2205}{4096}e^8 - \frac{72765}{131072}e^{10} - \frac{297297}{524288}e^{12} \\
 C_4 &= \frac{15}{256}e^4 + \frac{105}{1024}e^6 + \frac{2205}{16384}e^8 + \frac{10395}{65536}e^{10} + \frac{1486485}{8388608}e^{12} \\
 C_6 &= -\frac{35}{3072}e^6 - \frac{315}{12288}e^8 - \frac{31185}{786432}e^{10} - \frac{165165}{3145728}e^{12} \\
 C_8 &= \frac{315}{131072}e^8 + \frac{3465}{524288}e^{10} + \frac{99099}{8388608}e^{12} \\
 C_{10} &= -\frac{693}{1310720}e^{10} - \frac{9009}{5242880}e^{12} \\
 C_{12} &= \frac{1001}{8388608}e^{12}
 \end{aligned} \tag{13.32}$$

CQFD

### 13.4 Exercices et Problèmes

**Exercice 13.1** Dans cet exercice, on voudrait justifier l'arrêt à l'ordre 8 de l'expression de  $Y(UTM)$  en fonction de  $\lambda$ . On donne :  $\varphi = 40.00\text{ gr}$  et  $a = 6378249.20\text{ m}$ ,  $e^2 = 0.0068034877$ .

1. Calculer numériquement  $e'^2, \eta^2, t^2 = \text{tg}^2\varphi$  et  $N(\varphi)$ .
2. Calculer numériquement le coefficient  $a_8$  de (13.10).
3. On donne  $\lambda = 1.23546\text{ gr}$ , calculer  $a_8\lambda^8$  et conclure.

**Problème 13.1** Soit le point  $A$  de coordonnées géodésiques :  $\varphi = 40.9193\text{ gr}$  et  $\lambda = 11.9656\text{ gr}$  à l'Est de Greenwich. On considère la représentation plane UTM tronquée suivante, de méridien central  $\lambda_0 = 9^\circ$  définie par les formules :

$$\begin{cases} X = a_1 \cdot (\lambda - \lambda_0) + a_3 \cdot (\lambda - \lambda_0)^3 \\ Y = g(\varphi) + a_2 \cdot (\lambda - \lambda_0)^2 \end{cases}$$

où  $\varphi, \lambda$  et  $\lambda_0$  sont exprimées en rd, avec :

$$a_1 = N(\varphi) \cdot \cos \varphi$$

$$a_2 = \frac{a_1}{2} \cdot \sin \varphi$$

$$a_3 = \frac{a_1 \cos^2 \varphi}{6} (1 - \operatorname{tg}^2 \varphi + e'^2 \cdot \cos^2 \varphi)$$

$$N(\varphi) = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 \varphi}}$$

$$g(\varphi) = a(1 - e^2)(1.0051353 \cdot \varphi - 0.0025731 \sin 2\varphi)$$

$$a = 6378249.20 \text{ m}, e^2 = 0.0068034877, e'^2 = \frac{e^2}{1 - e^2}$$

1. Montrer que les coordonnées du point A sont :  $X = 157833.48 \text{ m}$ ,  $Y = 4078512.97 \text{ m}$ , on justifie les résultats.
2. Soit le point B de coordonnées ( $X = 160595.98 \text{ m}$ ;  $Y = 4078564.53 \text{ m}$ ). Sachant que B est situé sur le même parallèle que A, calculer la longitude  $\lambda'$  de B.
3. Calculer le gisement G et la distance AB.
4. Sachant que la convergence des méridiens  $\gamma$  est donnée par  $\operatorname{tg} \gamma = (\lambda - \lambda_0) \sin \varphi$  et qu'on néglige le  $Dv$ , calculer l'azimut de la direction AB.
5. Calculer l'azimut de B vers A en négligeant le  $Dv$  de B vers A.
6. En calculant les coordonnées UTM de A et B, on trouve respectivement  $X_A = 657770.34 \text{ m}$ ,  $Y_A = 4076891.20 \text{ m}$ ;  $X_B = 660531.74 \text{ m}$ ,  $Y_B = 4076942.76 \text{ m}$ . Calculer la distance AB par les coordonnées UTM. En déduire l'erreur relative sur la distance en utilisant les coordonnées de l'UTM tronquée.



# Chapitre 14

## *Les Transformations Entre Les Systèmes Géodésiques*

### 14.1 Introduction

Avec l'introduction de la technologie de positionnement par GPS (Global Positioning System), laquelle fournit à l'utilisateur sa position  $(X, Y, Z)$  tridimensionnelle dans le système géocentrique mondial dit *WGS84* (World Geodetic System 1984), il est nécessaire de savoir la transformation de passage du système géodésique mondial au système géodésique national ou local. On présente ci-après quelques modèles de transformations de passage entre les systèmes géodésiques.

On utilise par la suite les notations suivantes :

- $(X_1, Y_1, Z_1)$  les coordonnées cartésiennes 3D dans le système local (système 1);
- $(X_2, Y_2, Z_2)$  les coordonnées cartésiennes 3D dans le système géocentrique *WGS84* (système 2);
- $(\varphi_1, \lambda_1, h_{e1})$  les coordonnées géodésiques dans le système 1;
- $(\varphi_2, \lambda_2, h_{e2})$  les coordonnées géodésiques dans le système 2.

On propose d'étudier les transformations suivantes (*C. Boucher*, 1979b; *T. Soler*, 1998) :

- le modèle de Burša<sup>1</sup>- Wolf<sup>2</sup> ou Helmert à 7 paramètres,
- les formules de Molodensky<sup>3</sup>,
- les transformations bidimensionnelles.

## 14.2 Le Modèle de BURSA - WOLF

Ce modèle s'écrit sous la forme vectorielle :

$$X_2 = T + (1 + m) \cdot R(rx, ry, rz) \cdot X_1 \quad (14.1)$$

où :

- $X_2$  est le vecteur de composantes  $(X_2, Y_2, Z_2)^T$ , l'indice  $T$  désigne transposée;
- $T$  est le vecteur translation de composantes  $(T_X, T_Y, T_Z)^T$  entre les systèmes 1 et 2;
- $1 + m$  est le facteur d'échelle entre les 2 systèmes;
- $R(rx, ry, rz)$  est la matrice de rotation  $3 \times 3$  pour passer du système 1 au système 2;
- $X_1$  est le vecteur de composantes  $(X_1, Y_1, Z_1)^T$ .

En développant (14.1), on obtient :

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix} + (1 + m) \begin{pmatrix} 1 & rz & -ry \\ -rz & 1 & rx \\ ry & -rx & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} \quad (14.2)$$

avec  $(rx, ry, rz)$  les rotations comptées positivement dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. Comment a-t-on obtenu cette formule ?

---

1. **Milan Burša** : géodésien tchèque.  
 2. **Helmut Wolf** (1910-1994) : géodésien allemand.  
 3. **Mikhail Sergeevich Molodensky** (1909-1991) : géodésien et géophysicien russe.

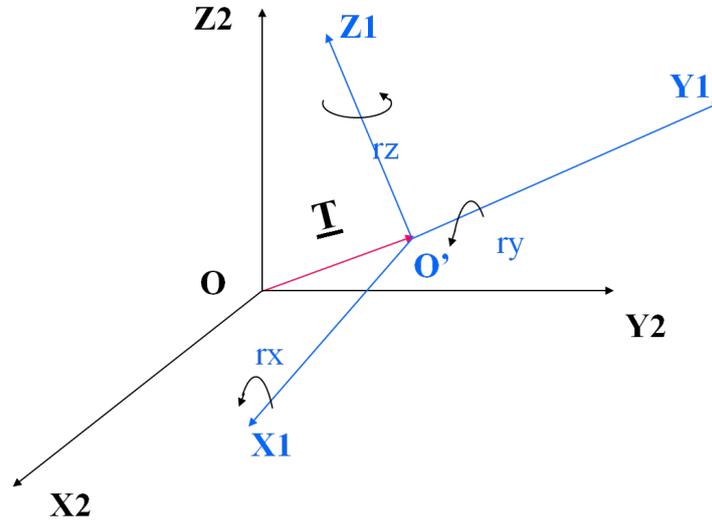


Fig. 14.1 Le modèle de Burša-Wolf

Posons :

$$\alpha = rx \quad (14.3)$$

$$\beta = ry \quad (14.4)$$

$$\gamma = rz \quad (14.5)$$

### 12.2.1. Matrices de Rotation

Dans (14.2),  $\alpha, \beta$  et  $\gamma$  sont les angles de rotation respectivement pour ramener les axes  $O'X_1, O'Y_1$  et  $O'Z_1$  parallèles aux axes  $OX_2, OY_2$  et  $OZ_2$ . Faisant abstraction de la translation entre les systèmes 1 et 2, soit un point  $M$  dans le plan  $OX'_1Y'_1$  d'affixe  $\xi_1 = X_1 + iY_1$ , dans le plan  $O'X_2Y_2$  le point  $M$  a l'affixe  $\xi_2 = X_2 + iY_2$ . On peut écrire :

$$\begin{aligned} \xi_2 &= X_2 + iY_2 = \rho e^{i\theta} \\ \xi_1 &= \rho e^{i(\theta+\gamma)} = \rho e^{i\theta} e^{i\gamma} = \xi_2 e^{i\gamma} \end{aligned}$$

En passant aux coordonnées, on a :

$$X_1 + iY_1 = e^{i\gamma}(X_2 + iY_2)$$

$$\Rightarrow X_2 + iY_2 = e^{-i\gamma}(X_1 + iY_1) = (\cos\gamma - i\sin\gamma)(X_1 + iY_1)$$

En séparant les parties réelles et imaginaires de l'équation précédente, on obtient :

$$\begin{aligned} X_2 &= X_1 \cos\gamma + Y_1 \sin\gamma \\ Y_2 &= -X_1 \sin\gamma + Y_1 \cos\gamma \\ \text{et } Z_2 &= Z_1 \end{aligned}$$

En les écrivant sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = R(\gamma) \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} \quad (14.6)$$

avec :

$$R(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14.7)$$

Appelons  $R(\alpha), R(\beta)$  les autres matrices de rotation. On a alors :

$$R(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \quad (14.8)$$

$$R(\beta) = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \quad (14.9)$$

Le modèle de Burša-Wolf est obtenu comme suit :

- on fait subir une rotation autour de  $O'X_1$  d'angle  $\alpha$  de matrice de rotation  $R(\alpha)$  ;
- on fait subir une rotation autour de  $O'Y_1$  d'angle  $\beta$  de matrice de rotation  $R(\beta)$  ;
- on fait subir une rotation autour de  $O'Z_1$  d'angle  $\gamma$  de matrice de rotation  $R(\gamma)$ .

Le résultat est la matrice :

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = R(\gamma) \cdot R(\beta) \cdot R(\alpha) \quad (14.10)$$

Comme les angles de rotations sont petits  $\leq 3^\circ$ , on va exprimer chaque matrice  $R$  en gardant seulement les termes du deuxième ordre. On utilise les développements limités à l'ordre deux :

$$\begin{aligned} \sin\alpha &\approx \alpha \\ \cos\alpha &\approx 1 - \frac{\alpha^2}{2} \end{aligned}$$

Alors les formules (14.7-14.9) deviennent :

$$R(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{\alpha^2}{2} & \alpha \\ 0 & -\alpha & 1 - \frac{\alpha^2}{2} \end{pmatrix} \quad (14.11)$$

$$R(\beta) = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\beta^2}{2} & 0 & -\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \beta & 0 & 1 - \frac{\beta^2}{2} \end{pmatrix} \quad (14.12)$$

$$R(\gamma) = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\gamma^2}{2} & \gamma & 0 \\ -\gamma & 1 - \frac{\gamma^2}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14.13)$$

En revenant à la formule (14.10), on obtient pour la matrice  $R(\alpha, \beta, \gamma)$  l'expression suivante à l'ordre 2 :

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\gamma^2}{2} - \frac{\beta^2}{2} & \gamma + \alpha\beta & -\beta + \alpha\gamma \\ -\gamma & 1 - \frac{\gamma^2}{2} - \frac{\alpha^2}{2} & \alpha + \beta\gamma \\ \beta & -\alpha & 1 - \frac{\alpha^2}{2} - \frac{\beta^2}{2} \end{pmatrix} \quad (14.14)$$

Maintenant, comme les trois angles sont petits, on va considérer que les termes du premier ordre ce qui donne pour  $R(\alpha, \beta, \gamma)$  :

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{pmatrix} 1 & \gamma & -\beta \\ -\gamma & 1 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 1 \end{pmatrix} \quad (14.15)$$

On revient à  $(rx, ry, rz)$ , on trouve :

$$R(rx, ry, rz) = \begin{pmatrix} 1 & rz & -ry \\ -rz & 1 & rx \\ ry & -rx & 1 \end{pmatrix} \quad (14.16)$$

La formule (14.2) s'écrit :

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix} + (1+m) \begin{pmatrix} 0 & rz & -ry \\ -rz & 0 & rx \\ ry & -rx & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} \quad (14.17)$$

### 12.2.2. Calcul des Paramètres du Modèle de Burša-Wolf par les Moindres Carrés

En considérant comme inconnues les paramètres  $T_X, T_Y, T_Z, m, rx, ry, rz$ , l'équation (14.2) s'écrit en gardant les termes du 1er ordre comme suit :

$$\begin{pmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & X_1 & 0 & -Z_1 & Y_1 \\ 0 & 1 & 0 & Y_1 & Z_1 & 0 & -X_1 \\ 0 & 0 & 1 & Z_1 & -Y_1 & X_1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \\ m \\ rx \\ ry \\ rz \end{pmatrix} \quad (14.18)$$

En utilisant l'équation (14.18) pour les  $n$  points communs dans les systèmes 1 et 2 et en posant :

$$L = (X_{2i} - X_{1i})_{i=1,n}$$

$$U = (T_X, T_Y, T_Z, m, rx, ry, rz)^T$$

$A$  est la matrice  $3n \times 7$  :

$$A = {}_{3n}A_7 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & X_i & 0 & -Z_i & Y_i \\ 0 & 1 & 0 & Y_i & Z_i & 0 & -X_i \\ 0 & 0 & 1 & Z_i & -Y_i & X_i & 0 \end{pmatrix}_{i=1,n} \quad (14.19)$$

et  $V$  le vecteur des résidus de la méthode des moindres carrés, la détermination des paramètres inconnus se fait par la résolution par les moindres carrés de l'équation :

$$AU = L + V \quad (14.20)$$

Soit :

$$\boxed{\bar{U} = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot L} \quad (14.21)$$

Le vecteur résidu est donné par :

$$V = A \cdot \bar{U} - L = A \cdot (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot L - L$$

Le facteur de la variance unitaire est exprimé par la formule :

$$\boxed{\sigma^2 = \frac{V^T V}{3n - 7}} \quad (14.22)$$

et la matrice variance-covariance du vecteur  $\bar{U}$  est donnée par :

$$\boxed{\sigma_{\bar{U}} = \sigma_0^2 (A^T A)^{-1}} \quad (14.23)$$

### 14.3 Les Formules de MOLODENSKY

Un point  $M$  a ses coordonnées géodésiques cartésiennes 3D dans un référentiel donné comme suit :

$$\begin{aligned} X &= (N + he) \cdot \cos\varphi \cdot \cos\lambda \\ Y &= (N + he) \cdot \cos\varphi \cdot \sin\lambda \\ Z &= (N(1 - e^2) + he) \cdot \sin\varphi \end{aligned} \quad (14.24)$$

avec :

- $N = a \cdot (1 - e^2 \cdot \sin^2\varphi)^{-1/2}$  : le rayon de courbure de la grande normale ;
- $a$  : le demi-grand axe de l'ellipsoïde de référence ;
- $e^2 = f(2 - f)$  : le carré de la 1ère excentricité ;
- $f = (a - b)/a$  : l'aplatissement de l'ellipsoïde de référence.

On pose :

$$w = (1 - e^2 \cdot \sin^2\varphi)^{-1/2}$$

Le rayon de courbure  $\rho$  de la méridienne s'écrit :

$$\rho = a(1 - e^2)w^3$$

Soit :

$$dX = \begin{pmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{pmatrix}, \quad d\Phi = \begin{pmatrix} d\lambda \\ d\varphi \\ dhe \end{pmatrix}, \quad dF = \begin{pmatrix} da \\ df \end{pmatrix} \quad (14.25)$$

En calculant  $(dX, dY, dZ)$  des équations (14.24) en fonction de  $d\varphi, d\lambda, dhe, da$  et  $df$  et sachant que  $d(N \cos\varphi) = -\rho \cdot \sin\varphi \cdot d\varphi$ , on trouve :

$$dX = J \cdot d\Phi + K \cdot dF \quad (14.26)$$

où les matrices  $J$  et  $K$  sont les suivantes :

$$J = \begin{pmatrix} -(N + he) \cos\varphi \sin\lambda & -(\rho + he) \sin\varphi \cos\lambda & \cos\varphi \cos\lambda \\ (N + he) \cos\varphi \cos\lambda & -(\rho + he) \sin\varphi \sin\lambda & \cos\varphi \sin\lambda \\ 0 & (\rho + he) \cos\varphi & \sin\varphi \end{pmatrix} \quad (14.27)$$

$$K = \begin{pmatrix} w \cos\varphi \cos\lambda & \rho \sin^2\varphi \cos\varphi \cos\lambda / (1 - f) \\ w \cos\varphi \sin\lambda & \rho \sin^2\varphi \cos\varphi \sin\lambda / (1 - f) \\ w(1 - e^2) \sin\varphi & (1 - f) \sin\varphi (\rho \sin^2\varphi - 2N) \end{pmatrix} \quad (14.28)$$

De l'équation (14.26), on tire :

$$d\Phi = J^{-1}.dX - J^{-1}.K.dF \quad (14.29)$$

avec :

$$J^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{-\sin\lambda}{(N+he)\cos\varphi} & \frac{\cos\lambda}{(N+he)\cos\varphi} & 0 \\ \frac{-\sin\varphi\cos\lambda}{\rho+he} & \frac{-\sin\varphi\sin\lambda}{\rho+he} & \frac{\cos\varphi}{\rho+he} \\ \frac{\cos\varphi\cos\lambda}{\cos\varphi\cos\lambda} & \frac{\cos\varphi\sin\lambda}{\cos\varphi\sin\lambda} & \frac{\sin\varphi}{\sin\varphi} \end{pmatrix} \quad (14.30)$$

$$J^{-1}K = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{-we^2\sin\varphi\cos\varphi}{\rho+he} & \frac{-\rho\sin\varphi\cos\varphi(2-e^2\sin^2\varphi)}{(\rho+he)(1-f)} \\ \frac{1}{w} & -N(1-f)\sin^2\varphi \end{pmatrix} \quad (14.31)$$

Or, en prenant :

$$dX = \begin{pmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{pmatrix} \quad (14.32)$$

on a d'après l'équation (14.18)  $dX = A.U$ , par suite en posant :

$$\begin{aligned} d\varphi &= \varphi_2 - \varphi_1 \\ d\lambda &= \lambda_2 - \lambda_1 \\ dhe &= he_2 - he_1 \\ da &= a_2 - a_1 \\ df &= f_2 - f_1 \end{aligned}$$

avec  $(a_1, f_1)$  et  $(a_2, f_2)$  sont respectivement les demi-grands axes et les aplatissements des ellipsoïdes des systèmes 1 et 2, on a alors :

$$d\Phi = J^{-1}.A.U - J^{-1}.K.dF \quad (14.33)$$

avec  $J^{-1}A$  la matrice  $3 \times 7$  donnée ci-dessous :

$$J^{-1}A = \begin{pmatrix} \frac{-\sin\lambda}{(N+he)\cos\varphi} & \frac{\cos\lambda}{(N+he)\cos\varphi} & 0 & 0 \\ \frac{-\sin\varphi\cos\lambda}{\rho+he} & \frac{-\sin\varphi\sin\lambda}{\rho+he} & \frac{\cos\varphi}{\rho+he} & \frac{-e^2N\cos\varphi\sin\varphi}{\rho+he} \\ \frac{\cos\varphi\cos\lambda}{\cos\varphi\cos\lambda} & \frac{\cos\varphi\sin\lambda}{\cos\varphi\sin\lambda} & \frac{\sin\varphi}{\sin\varphi} & N(1-e^2\sin^2\varphi)+he \end{pmatrix}$$

$$\left( \begin{array}{cc|c} \frac{(N(1-e^2)+he)tg\varphi\cos\lambda}{N+he} & \frac{(N(1-e^2)+he)tg\varphi\sin\lambda}{N+he} & -1 \\ \frac{-(N(1-e^2\sin^2\varphi)+he)\sin\lambda}{\rho+he} & \frac{(N(1-e^2\sin^2\varphi)+he)\cos\lambda}{\rho+he} & 0 \\ -e^2N\sin\varphi\cos\varphi\sin\lambda & e^2N\cos\varphi\sin\varphi\cos\lambda & 0 \end{array} \right)$$

En développant l'équation (14.33), on obtient les formules de **MOLODENSKY** de passage du système 1 au système 2 :

$$\lambda_2 - \lambda_1 = -\frac{\sin\lambda_1}{(N_1+he_1)\cos\varphi_1}T_X + \frac{\cos\lambda_1}{(N_1+he_1)\cos\varphi_1}T_Y + \frac{(N_1(1-e_1^2)+he_1)tg\varphi_1\cos\lambda_1}{N_1+he_1}rx + \frac{(N_1(1-e_1^2)+he_1)tg\varphi_1\sin\lambda_1}{N_1+he_1}ry - rz$$

(14.34)

$$\varphi_2 - \varphi_1 = -\frac{\sin\varphi_1\cos\lambda_1}{\rho_1+he_1}T_X - \frac{\sin\varphi_1\sin\lambda_1}{\rho_1+he_1}T_Y + \frac{\cos\varphi_1}{\rho_1+he_1}T_Z - \frac{e_1^2N_1\cos\varphi_1\sin\varphi_1}{\rho_1+he_1}m - \frac{(N_1(1-e_1^2\sin^2\varphi_1)+he_1)\sin\lambda_1}{\rho_1+he_1}rx - \frac{(N_1(1-e_1^2\sin^2\varphi_1)+he_1)\cos\lambda_1}{\rho_1+he_1}ry + \frac{w_1e_1^2\sin\varphi_1\cos\varphi_1}{\rho_1+he_1}\Delta a + \frac{\rho_1\sin 2\varphi_1(2-e_1^2\sin^2\varphi_1)}{2(\rho_1+he_1)(1-f_1)}\Delta f$$

(14.35)

$$he_2 - he_1 = \cos\varphi_1\cos\lambda_1T_X + \cos\varphi_1\sin\lambda_1T_Y + \sin\varphi_1T_Z + (N_1(1-e_1^2\sin^2\varphi_1)+he_1)m - e_1^2N_1\cos\varphi_1\sin\varphi_1\sin\lambda_1rx + e_1^2N_1\cos\varphi_1\sin\varphi_1\cos\lambda_1ry - \frac{\Delta a}{w_1} + N_1(1-f_1)\sin^2\varphi_1\Delta f$$

(14.36)

Des équations (14.34)-(14.36), on remarque que :

\*  $\lambda_2 - \lambda_1$  est indépendante de  $T_Z, m, a_1$  et  $f_1$  ;

\*  $\varphi_2 - \varphi_1$  est indépendante de  $rz$  ;

\*  $he_2 - he_1$  est indépendante de  $rz$ .

On trouve souvent dans la littérature géodésique des formules de MOLODENSKY dites Standard et Abrégées qu'on donne ci-dessous.

#### 14.4 Les Formules de MOLODENSKY Standard

Elles sont obtenues en ne tenant pas compte du facteur d'échelle et des rotations c'est-à-dire  $m = 0$  et  $rx = ry = rz = 0$  dans les formules (14.34)-(14.36) et on obtient alors les formules suivantes en posant :

$$\begin{aligned}
 \Delta\varphi'' &= \varphi_2 - \varphi_1 \text{ en secondes sexagésimales} \\
 \Delta\lambda'' &= \lambda_2 - \lambda_1 \text{ en secondes sexagésimales} \\
 \Delta he &= he_2 - he_1 \\
 \Delta X &= T_X \\
 \Delta Y &= T_Y \\
 \Delta Z &= T_Z
 \end{aligned}
 \tag{14.37}$$

et en omettant les indices :

$$\begin{aligned}
 \Delta\varphi'' &= (-\Delta X \sin\varphi \cos\lambda - \Delta Y \sin\varphi \sin\lambda + \Delta Z \cos\varphi + \\
 &Ne^2 \sin\varphi \cos\varphi \cdot \frac{\Delta a}{a} + \Delta f \left(\rho \frac{a}{b} + N \frac{b}{a}\right) \cdot \sin\varphi \cos\varphi) \cdot ((\rho + he) \cdot \sin 1'')^{-1} \\
 \Delta\lambda'' &= (-\Delta X \sin\lambda + \Delta Y \cos\lambda) \cdot ((N + he) \cos\varphi \sin 1'')^{-1} \\
 \Delta he &= \Delta X \cos\varphi \cos\lambda + \Delta Y \cos\varphi \sin\lambda + \Delta Z \sin\varphi - a \frac{\Delta a}{N} + \Delta f \cdot N(1-f) \sin^2\varphi
 \end{aligned}
 \tag{14.38}$$

avec  $b$  le demi-petit axe de l'ellipsoïde 1.

#### 14.5 Les Formules de MOLODENSKY Abrégées

On fait  $he = 0$  et garde les termes du 1er ordre en  $f$  dans les formules Standard, on trouve :

$$\begin{aligned}
 \Delta\varphi'' &= \frac{-\Delta X \sin\lambda + \Delta Y \cos\lambda}{N \cos\varphi \sin 1''} \\
 \Delta\lambda'' &= \frac{-\Delta X \sin\varphi \cos\lambda - \Delta Y \sin\varphi \sin\lambda + \Delta Z \cos\varphi + (a\Delta f + f\Delta a) \sin 2\varphi}{\rho \sin 1''} \\
 \Delta h e &= \Delta X \cos\varphi \cos\lambda + \Delta Y \cos\varphi \sin\lambda + \Delta Z \sin\varphi - \Delta a + (a\Delta f + f\Delta a) \sin^2\varphi
 \end{aligned}
 \tag{14.39}$$

### 14.6 La Recherche des Paramètres de Passage par les Formules de MOLODENSKY

A partir de l'équation (14.33) on a :

$$d\Phi = J^{-1}.A.U - J^{-1}.K.dF$$

soit :

$$J^{-1}.A.U = d\Phi + J^{-1}.K.dF \tag{14.40}$$

où  $U$  est le vecteur des inconnues  $(T_X, T_Y, T_Z, m, rx, ry, rz)^T$ . En écrivant l'équation précédente pour les  $n$  points communs et en posant :

$$L = (d\Phi_i + J_i^{-1}.K_i.dF)_{i=1,n} \tag{14.41}$$

le vecteur des observations  $3n \times 1$  et :

$$B = (J_i^{-1}.A_i)_{i=1,n} \tag{14.42}$$

la matrice des coefficients  $3n \times 7$  et  $V$  le vecteur des résidus de la méthode des moindres carrés, la détermination des paramètres inconnus se fait par la résolution par les moindres carrés de l'équation :

$$B.U = L + V \tag{14.43}$$

Le vecteur solution est :

$$\bar{U} = (B^T.B)^{-1}.B^T.L \tag{14.44}$$

Le vecteur résidu est :

$$V = B.\bar{U} - L = B.(B^T.B)^{-1}.B^T.L - L \tag{14.45}$$

Le facteur de la variance unitaire est donné par :

$$\sigma^2 = \frac{V^T V}{3n - 7} \quad (14.46)$$

La matrice variance-covariance du vecteur  $\bar{U}$  est donnée par :

$$\sigma_{\bar{U}} = \sigma^2 \cdot (B^T \cdot B)^{-1} \quad (14.47)$$

### 14.7 La Détermination des paramètres du Modèle de Burša-Wolf

Dans ce paragraphe, on veut calculer manuellement les paramètres du modèle de Burša-Wolf vu précédemment :

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{T} + (1 + m) \cdot R(rx, ry, rz) \cdot \mathbf{X}_1 \quad (14.48)$$

En développant (14.48), on obtient :

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{pmatrix} + (1 + m) \begin{pmatrix} 1 & rz & -ry \\ -rz & 1 & rx \\ ry & -rx & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} \quad (14.49)$$

avec  $(rx, ry, rz)$  les rotations comptées positivement dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. Comment déterminer les paramètres modèle (14.48) ?

#### 12.7.1. Détermination de l'échelle $1 + m$

On suppose donné un ensemble de points  $P_i$  pour  $i = 1, n$  connus dans les deux systèmes  $S_1$  et  $S_2$ . On écrit l'équation (14.48) pour deux points  $P_j$  et  $P_k$ , d'où :

$$\mathbf{X}(P_j)_2 = \mathbf{T} + (1 + m) \cdot R(rx, ry, rz) \cdot \mathbf{X}(P_j)_1 \quad (14.50)$$

$$\mathbf{X}(P_k)_2 = \mathbf{T} + (1 + m) \cdot R(rx, ry, rz) \cdot \mathbf{X}(P_k)_1 \quad (14.51)$$

Par différence, on obtient :

$$(\mathbf{P}_j \mathbf{P}_k)_2 = (1 + m) \cdot R(rx, ry, rz) \cdot (\mathbf{P}_j \mathbf{P}_k)_1 \quad (14.52)$$

On prend la norme des deux membres de (14.52) et que  $1 + m > 0$  :

$$\|(\mathbf{P}_j \mathbf{P}_k)_2\| = \|(1+m) \cdot R(rx, ry, rz) \cdot (\mathbf{P}_j \mathbf{P}_k)_1\| = (1+m) \|R(rx, ry, rz) \cdot (\mathbf{P}_j \mathbf{P}_k)_1\| \quad (14.53)$$

Comme  $R$  est une matrice de rotation, donc son application à un vecteur est une isométrie, c'est-à-dire qu'elle laisse invariant la norme ou la longueur du vecteur, soit :

$$\|R \cdot \mathbf{X}\| = \|\mathbf{X}\|, \quad \forall \mathbf{X} \in \mathbb{R}^3 \quad (14.54)$$

On a donc :

$$\|(\mathbf{P}_j \mathbf{P}_k)_2\| = (1+m) \|(\mathbf{P}_j \mathbf{P}_k)_1\| \quad (14.55)$$

Soit :

$$1 + m = \frac{1}{N} \sum \frac{\|(\mathbf{P}_j \mathbf{P}_k)_2\|}{\|(\mathbf{P}_j \mathbf{P}_k)_1\|} \quad (14.56)$$

$N$  désigne le nombre de couples de points  $P_j P_k, j \neq k$ .

### 12.7.2. Détermination des rotations $(rx, ry, rz)$

Connaissant  $(1+m)$ , pour un couple de points  $P_j, P_k$ , on a :

$$(\mathbf{P}_j \mathbf{P}_k)_2 = (1+m) \cdot R(rx, ry, rz) \cdot (\mathbf{P}_j \mathbf{P}_k)_1 \quad (14.57)$$

On détaille la matrice  $R$  :

$$R = \begin{pmatrix} 1 & rz & -ry \\ -rz & 1 & rx \\ ry & -rx & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & rz & -ry \\ -rz & 0 & rx \\ ry & -rx & 0 \end{pmatrix} = I_3 + Q \quad (14.58)$$

avec  $I_3$  la matrice unité et  $Q$  la matrice :

$$Q = \begin{pmatrix} 0 & rz & -ry \\ -rz & 0 & rx \\ ry & -rx & 0 \end{pmatrix} \quad (14.59)$$

Alors l'équation (14.52) devient :

$$(\mathbf{P}_j \mathbf{P}_k)_2 = (1+m) \cdot (I_3 + Q(rx, ry, rz)) \cdot (\mathbf{P}_j \mathbf{P}_k)_1 \quad (14.60)$$

Comme  $m \ll 1$  et  $m^2 \ll 1$ , on a :

$$Q(rx, ry, rz) \cdot (\mathbf{P}_j \mathbf{P}_k)_1 = (1-m) \cdot (\mathbf{P}_j \mathbf{P}_k)_2 - (\mathbf{P}_j \mathbf{P}_k)_1 \quad (14.61)$$

En posant :

$$(\mathbf{P}_j \mathbf{P}_k)_2 = \begin{vmatrix} \Delta X'_{jk} \\ \Delta Y'_{jk} \\ \Delta Z'_{jk} \end{vmatrix} ; \quad (\mathbf{P}_j \mathbf{P}_k)_1 = \begin{vmatrix} \Delta X_{jk} \\ \Delta Y_{jk} \\ \Delta Z_{jk} \end{vmatrix} ; \quad v = \begin{vmatrix} v_1 = (1-m)\Delta X'_{jk} - \Delta X_{jk} \\ v_2 = (1-m)\Delta Y'_{jk} - \Delta Y_{jk} \\ v_3 = (1-m)\Delta Z'_{jk} - \Delta Z_{jk} \end{vmatrix} \quad (14.62)$$

Alors, on obtient l'équation :

$$Q(rx, ry, rz) \cdot (\mathbf{P}_j \mathbf{P}_k)_1 = v \quad (14.63)$$

ou encore :

$$\begin{pmatrix} 0 & -\Delta Z_{jk} & \Delta Y_{jk} \\ \Delta Z_{jk} & 0 & -\Delta X_{jk} \\ -\Delta Y_{jk} & \Delta X_{jk} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} rx \\ ry \\ rz \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} \quad (14.64)$$

Or le déterminant de la matrice  $Q'$  :

$$Q' = \begin{pmatrix} 0 & -\Delta Z_{jk} & \Delta Y_{jk} \\ \Delta Z_{jk} & 0 & -\Delta X_{jk} \\ -\Delta Y_{jk} & \Delta X_{jk} & 0 \end{pmatrix} \quad (14.65)$$

est nul. Pour passer de cette conséquence, on utilise pour chaque ligne du système (14.64) un couple de points  $ij$  ce qui donne le système :

$$\boxed{\begin{pmatrix} 0 & -\Delta Z_{jk} & \Delta Y_{jk} \\ \Delta Z_{lm} & 0 & -\Delta X_{lm} \\ -\Delta Y_{in} & \Delta X_{in} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} rx \\ ry \\ rz \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{jk1} \\ v_{lm2} \\ v_{in3} \end{pmatrix}} \quad (14.66)$$

Le système (14.66) devient résoluble ce qui permet de déterminer les trois rotations  $rx, ry$  et  $rz$ .

### 12.7.3. Détermination des composantes de la Translation $T$

Les composantes  $Tx, Ty, Tz$  du vecteur translation sont déterminées à partir des coordonnées des points  $P_j$  communs dans les deux systèmes à partir de :

$$Tx_j = X_{2j} - (1+m)(X_{1j} - rxY_{1j} + ryZ_{1j}) \quad (14.67)$$

$$Ty_j = Y_{2j} - (1+m)(rxX_{1j} + Y_{1j} - rzZ_{1j}) \quad (14.68)$$

$$Tz_j = Z_{2j} - (1+m)(-ryX_{1j} + rzY_{1j} + Z_{1j}) \quad (14.69)$$

Les composantes  $T_x, T_y, T_z$  sont obtenues par une moyenne sur les  $N$  points communs à savoir :

$$\boxed{\begin{aligned} T_x &= \frac{\sum^N T_{x_j}}{N} \\ T_y &= \frac{\sum^N T_{y_j}}{N} \\ T_z &= \frac{\sum^N T_{z_j}}{N} \end{aligned}} \quad (14.70)$$

## 14.8 La Transformation de HELMERT Bidimensionnelle

Cette transformation s'écrit sous la forme vectorielle :

$$\boxed{X_2 = T + s.R(\theta).X_1} \quad (14.71)$$

où :

- $X_2$  est le vecteur de composantes  $(X_2, Y_2)^T$ ,  $(X_2, Y_2)$  désignent les coordonnées planimétriques du système 2 ;
- $T$  est le vecteur translation de composantes  $(T_x, T_y)^T$  entre les systèmes 1 et 2 ;
- $s$  est le facteur d'échelle entre les 2 systèmes ;
- $R(\theta)$  est la matrice de rotation  $2 \times 2$  pour passer du système 1 au système 2 ;
- $X_1$  est le vecteur de composantes  $(X_1, Y_1)^T$  où  $X_1, Y_1$  désignent les coordonnées dans le système 1.

En développant (14.71), on obtient :

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \end{pmatrix} + s \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{pmatrix} \quad (14.72)$$

En prenant comme inconnues auxiliaires :

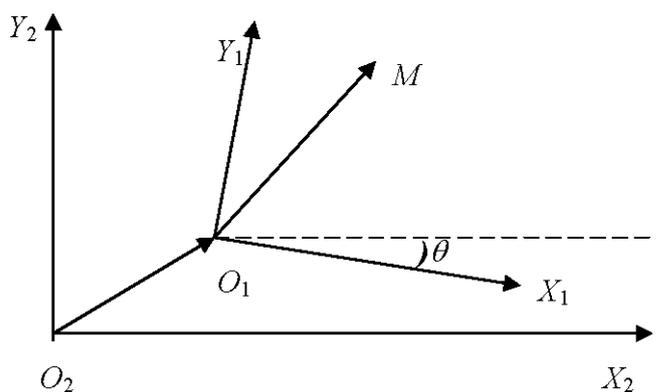
$$v = s.\sin\theta \quad (14.73)$$

$$u = s.\cos\theta \quad (14.74)$$

le système (14.72) devient :

$$\begin{aligned} X_2 &= T_x + X_1.u - Y_1.v \\ Y_2 &= T_y + X_1.v + Y_1.u \end{aligned} \quad (14.75)$$

Les inconnues  $T_x, T_y, u$  et  $v$  seront déterminées par la méthode des moindres carrés en utilisant des points communs dans les deux systèmes. Ayant  $u$  et  $v$ ,



**Fig. 14.2** Modèle de Helmert

on déduit :

$$\begin{cases} s = \sqrt{u^2 + v^2} \\ \operatorname{tg}\theta = \frac{v}{u} \end{cases} \quad (14.76)$$

### 12.8.1. Résolution par les Moindres Carrés

On résout par la méthode des moindres carrés le système (14.75). On suppose la donnée de  $n$  points communs entre le système  $S_1$  et le système  $S_2$  :

- $(X'_i, Y'_i)_{i=1,n}$  dans le système  $S_2$  ;
- $(X_i, Y_i)_{i=1,n}$  dans le système  $S_1$ .

On pose :

$$\bar{X} = \frac{\sum_1^n X_i}{n}, \quad \bar{Y} = \frac{\sum_1^n Y_i}{n}, \quad \bar{X}' = \frac{\sum_1^n X'_i}{n}, \quad \bar{Y}' = \frac{\sum_1^n Y'_i}{n} \quad (14.77)$$

les coordonnées respectives des centres de gravité, des points communs, dans  $S_1$  et  $S_2$ .

On pose de même :

$$\begin{aligned}x_i &= X_i - \bar{X} \\y_i &= Y_i - \bar{Y} \\x'_i &= X'_i - \bar{X}' \\y'_i &= Y'_i - \bar{Y}'\end{aligned}\tag{14.78}$$

Dans ce cas, le système (14.75) s'écrit :

$$\begin{aligned}x'_i &= T_x + x_i \cdot u - y_i \cdot v \\y'_i &= T_y + x_i \cdot v + y_i \cdot u\end{aligned}\tag{14.79}$$

Soit  $(T_x^0, T_y^0, u_0, v_0)$  une solution approchée du système. On note alors :

$$\begin{aligned}T_x &= T_x^0 + dt_x \\T_y &= T_y^0 + dt_y \\u &= u_0 + du \\v &= v_0 + dv\end{aligned}\tag{14.80}$$

Alors les équations (14.79) deviennent :

$$\begin{aligned}x'_i &= T_x^0 + dt_x + x_i \cdot (u_0 + du) - y_i \cdot (v_0 + dv) \\y'_i &= T_y^0 + dt_y + x_i \cdot (v_0 + dv) + y_i \cdot (u_0 + du)\end{aligned}\tag{14.81}$$

On écrit ces dernières équations sous la forme de l'équation des moindres carrés :

$$A \cdot X = L + W\tag{14.82}$$

avec  $X$  le vecteur des inconnues :

$$X = \begin{pmatrix} dt_x \\ dt_y \\ du \\ dv \end{pmatrix}\tag{14.83}$$

$L$  le vecteur des observables :

$$L = \begin{pmatrix} x'_1 - T_x^0 - x_1 u_0 + y_1 v_0 \\ y'_1 - T_y^0 - x_1 v_0 - y_1 u_0 \\ \vdots \\ x'_i - T_x^0 - x_i u_0 + y_i v_0 \\ y'_i - T_y^0 - x_i v_0 - y_i u_0 \\ \vdots \\ x'_n - T_x^0 - x_n u_0 + y_n v_0 \\ y'_n - T_y^0 - x_n v_0 - y_n u_0 \end{pmatrix} \quad (14.84)$$

$W$  le vecteur des résidus :

$$W = \begin{pmatrix} w_{x_1} \\ w_{y_1} \\ \vdots \\ w_{x_n} \\ w_{y_n} \end{pmatrix} \quad (14.85)$$

et  $A$  la matrice des coefficients :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & x_1 & -y_1 \\ 0 & 1 & y_1 & x_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & x_i & -y_i \\ 0 & 1 & y_i & x_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & x_n & -y_n \\ 0 & 1 & y_n & x_n \end{pmatrix} \quad (14.86)$$

### 12.8.2. La Solution par les Moindres Carrés

La solution de (14.82) par les moindres carrés donne :

$$\bar{X} = (A^T A)^{-1} A^T L \quad (14.87)$$

On pose :

$$N = A^T A \quad (14.88)$$

qu'on appelle matrice normale du système (14.82). On obtient alors :

$$N = \begin{pmatrix} n & 0 & \sum x_i & -\sum y_i \\ 0 & n & \sum y_i & \sum x_i \\ \sum x_i & \sum y_i & \sum(x_i^2 + y_i^2) & 0 \\ -\sum y_i & \sum x_i & 0 & \sum(x_i^2 + y_i^2) \end{pmatrix} \quad (14.89)$$

Comme on travaille par rapport aux centres de gravité des coordonnées de  $S_1$  et  $S_2$ , on a alors par définition :

$$\sum x_i = \sum y_i = \sum x'_i = \sum y'_i = 0 \quad (14.90)$$

De plus on note :

$$d_i^2 = x_i^2 + y_i^2 \quad (14.91)$$

Alors la matrice  $N$  s'écrit facilement :

$$N = \begin{pmatrix} n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sum d_i^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sum d_i^2 \end{pmatrix} \quad (14.92)$$

La matrice normale est diagonale, son inverse est donné par :

$$N^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{n} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sum d_i^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sum d_i^2} \end{pmatrix} \quad (14.93)$$

Or on sait que :

$$\sigma_X^2 = \sigma_0^2 \cdot N^{-1} \quad (14.94)$$

où  $\sigma_0^2$  est le facteur de variance unitaire donné par :

$$\sigma_0^2 = \frac{W^T W}{n-4} = \frac{\sum_i w_i^2}{n-4} \quad (14.95)$$

De l'équation (14.94), on voit que :

$$\boxed{\sigma_{dt_x}^2 = \sigma_{dt_y}^2 = \frac{\sigma_0^2}{n}} \quad (14.96)$$

**Propriété 13.1** Dans une transformation de Helmert bidimensionnelle, plus le nombre de points communs  $n$  entre les deux systèmes est grand, plus la détermination du vecteur translation  $T = (T_x, T_y)^T$  est précise.

Quant aux deux autres inconnues (facteur d'échelle et la rotation), on a :

$$\sigma_u^2 = \sigma_v^2 = \sigma_0^2 \frac{1}{\sum d_i^2} \quad (14.97)$$

Soit  $D = \max(d_i)$ . Si on veut imposer  $\sigma_u^2$  égal à  $\tilde{\sigma}_u^2$  donné, quelles conditions doivent vérifier les  $d_i$ . On a :

$$\tilde{\sigma}_u^2 = \sigma_0^2 \frac{1}{\sum d_i^2} \Rightarrow \sum d_i^2 = \frac{\sigma_0^2}{\tilde{\sigma}_u^2} \quad (14.98)$$

Or :

$$d_i \leq D \Rightarrow \sum_{i=1}^{i=n} d_i^2 \leq nD^2$$

Par suite :

$$\boxed{\frac{\sigma_0^2}{\tilde{\sigma}_u^2} \leq nD^2 \Rightarrow D^2 \geq \frac{\sigma_0^2}{n\tilde{\sigma}_u^2}} \quad (14.99)$$

D'où :

**Propriété 13.2** Dans une transformation de Helmert bidimensionnelle, en imposant un écart-type donné de la rotation  $\tilde{\sigma}_u$ , la distance maximale  $D$  qu'on peut prendre vaut  $\frac{\sigma_0}{\tilde{\sigma}_u \sqrt{n}}$ .

## 14.9 Exercices et Problèmes

**Exercice 14.1** On donne le modèle bidimensionnel suivant, de transformation entre deux systèmes géodésiques, défini par :

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -21.662 \text{ m} \\ -627.748 \text{ m} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.999988149 & -0.000025928 \\ -0.000025928 & 0.999988149 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{pmatrix}$$

1. S'agit-il du modèle bidimensionnel de Helmert ? Justifier.

2. Donner les valeurs numériques respectivement du facteur d'échelle et de l'angle de la rotation entre les deux systèmes.

**Exercice 14.2** Reprenant les tableaux données ci-dessous, calculer les coordonnées géodésiques des points  $(\varphi, \lambda, h_e)$  sachant que l'ellipsoïde de référence est l'ellipsoïde GRS80 ( $a = 6378137.00\text{m}$ ,  $e^2 = 0.0066943800229$ ).

1. Calculer les coordonnées UTM en prenant le fuseau adéquat.
2. En considérant le modèle de Helmert entre les systèmes S1 et S2, calculer les paramètres de la transformation.
3. Déterminer les images des points A, B, C et D.

**Problème 14.1** Soient les trois tableaux ci-dessous des coordonnées 3D respectivement dans les systèmes S1 et S2 et à transformer dans le système S2 :

Nom	X(m)	Y(m)	Z(m)
1	4300244.860	1062094.681	4574775.629
2	4277737.502	1115558.251	4582961.996
3	4276816.431	1081197.897	4591886.356
4	4315183.431	1135854.241	4542857.520
5	4285934.717	1110917.314	4576361.689
6	4217271.349	1193915.699	4618635.464
7	4292630.700	1079310.256	4579117.105

Nom	X'(m)	Y'(m)	Z'(m)
1	4300245.018	1062094.592	4574775.510
2	4277737.661	1115558.164	4582961.878
3	4276816.590	1081197.809	4591886.238
4	4315183.590	1135854.153	4542857.402
5	4285934.876	1110917.227	4576361.571
6	4217271.512	1193915.612	4618635.348
7	4292630.858	1079310.168	4579116.986

Nom	X(m)	Y(m)	Z(m)
A	4351694.594	1056274.819	4526994.706
B	4319956.455	1095408.043	4548544.867
C	4303467.472	1110727.257	4560823.460
D	4202413.995	1221146.648	4625014.614

1. Déterminer les paramètres du modèle de Burša-Wolf à 7 paramètres.
2. Calculer les coordonnées 3D des points du troisième tableau dans le système S2.



# Chapitre 15

## *Notions sur le Mouvement d'un Satellite Artificiel de la Terre*

Avant de passer au chapitre sur le système GPS, il est utile pour le lecteur d'avoir des notions sur le mouvement d'un satellite artificiel autour de la Terre.

### 15.1 Les Equations du Mouvement

On considère un satellite de masse  $m$  dont la position est définie par le vecteur  $\mathbf{OS} = \mathbf{r}$ . La Terre est considérée comme une masse ponctuelle de masse  $m'$  située au point  $O$  centre de la Terre ( $m' = (5973 \pm 1) \times 10^{21} \text{ kg}$ ).

L'équation du mouvement du satellite est donnée par :

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{F} = -G \frac{mm'}{r^3} \mathbf{r} \quad (15.1)$$

avec  $\mathbf{F}$  la force d'attraction gravitationnelle et  $G$  est la constante universelle de la gravitation de valeur égale à  $(6673 \pm 1) \times 10^{-14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$  (*H. Moritz & I.I. Mueller, 1988*).

L'équation (15.1) s'écrit aussi :

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{F} = \mathbf{grad}V \quad (15.2)$$

On dit que  $\mathbf{F}$  dérive du potentiel  $V$  avec :

$$V = G \frac{mm'}{r} \quad (15.3)$$

On pose :

$$\mu = Gm' = (3986005 \pm 0.5) \times 10^8 m^3 s^{-2} \quad (15.4)$$

L'équation (15.1) s'écrit :

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\mu \frac{\mathbf{r}}{r^3} \quad (15.5)$$

Comme :

$$\mathbf{r} = \begin{cases} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{cases}$$

alors l'équation vectorielle (15.5) s'écrit en trois équations différentielles du deuxième ordre comme suit :

$$\begin{cases} \ddot{X}_C + \frac{\mu}{r^3} X_C = 0 \\ \ddot{Y}_C + \frac{\mu}{r^3} Y_C = 0 \\ \ddot{Z}_C + \frac{\mu}{r^3} Z_C = 0 \end{cases} \quad (15.6)$$

Après l'intégration des équations (15.6), on obtient six paramètres des conditions initiales qui définissent la forme et la position de l'orbite et une constante donnant la variation du mouvement du satellite avec le temps.

Les équations (15.6) montrent qu'on a un mouvement d'un corps dans un champ central.

### 15.1.1. La 2ème Loi de Kepler

1. Si on applique le théorème du moment cinétique, on obtient :

$$\frac{d\sigma}{dt} = 0 \quad (15.7)$$

car :

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{OS} \wedge \mathbf{v} = \mathbf{C} = \text{constante} \quad (15.8)$$

En effet, en dérivant (15.8) par rapport au temps, on a alors :

$$\frac{d\boldsymbol{\sigma}}{dt} = \frac{d\mathbf{OS}}{dt} \wedge \mathbf{v} + \mathbf{OS} \wedge \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{v} \wedge \mathbf{v} + \mathbf{OS} \wedge \ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{r} \wedge \ddot{\mathbf{r}} \quad (15.9)$$

Or d'après (15.5) :

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{\mu}{r^3} \mathbf{r}$$

D'où :

$$\frac{d\boldsymbol{\sigma}}{dt} = -\frac{\mu}{r^3} \mathbf{r} \wedge \mathbf{r} = \mathbf{0} \quad (15.10)$$

On déduit donc (15.8) et on a :

$$C = \|\mathbf{C}\| = \text{constante des aires} \quad (15.11)$$

De (15.8), le mouvement se fait dans un plan, en définissant  $\mathbf{OS} = \mathbf{r} = \mathbf{r}(r, v)$ , alors les composantes de  $\mathbf{v}$  vecteur vitesse sur le rayon vecteur  $\mathbf{r}$  et de la direction perpendiculaire sont :

$$\mathbf{v} = \begin{cases} \frac{dr}{dt} \\ r \frac{dv}{dt} \end{cases} \quad (15.12)$$

On a alors :

$$C = r \cdot r \frac{dv}{dt} = r^2 \frac{dv}{dt} \quad (15.13)$$

et aussi :

$$\dot{\Sigma} = \frac{d\Sigma}{dt} = \frac{r^2 dv}{2dt} \quad (15.14)$$

avec  $\Sigma$  la surface balayée par le vecteur position.

Des équations (15.13) et (15.14), on a la 2<sup>ème</sup> loi de Kepler :

$$\boxed{\dot{\Sigma} = \frac{1}{2}C = \text{constante}} \quad (15.15)$$

**Théorème 15.1** (*Deuxième loi de Kepler, ou loi des aires*) L'aire balayée par le vecteur position  $\mathbf{r}(t)$  varie linéairement avec le temps.

2. Si on applique le théorème de l'énergie cinétique sous forme différentielle, on obtient :

$$d\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} dt \quad (15.16)$$

où :

$$\mathbf{F} \cdot \mathbf{v} = -\mu \frac{m}{r^3} \mathbf{r} \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{-\mu m}{r^2} \frac{dr}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\mu m}{r} \right) \quad (15.17)$$

En remplaçant (15.17) dans le second membre de (15.16) et en intégrant, on arrive à :

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{\mu m}{r} = \text{constante}$$

Soit :

$$\boxed{\frac{1}{2}mv^2 - \frac{\mu m}{r} = H = \text{constante}} \quad (15.18)$$

où  $H$  est la constante de l'énergie ou l'énergie.

**Lemme 15.1** Les fonctions  $H$  et  $C$  sont constantes le long des solutions : on dit que ce sont des intégrales premières du mouvement, c'est-à-dire que  $H$  et  $C$  sont des fonctions de la position  $r$  et de la dérivée première de  $r$  par rapport au temps ( $t$ ), constantes au cours du temps.

En effet, des équations (15.11) et (15.18), on a respectivement :

$$H = H(r, v) = \text{constante}$$

et :

$$C = C(r, v) = r^2 \frac{dv}{dt} = \text{constante}$$

On note que  $H = T - L$  s'appelle aussi le hamiltonien<sup>1</sup> du mouvement keplérien. En effet,  $T = \frac{1}{2}mv^2$  est l'énergie cinétique et  $U$  est le potentiel  $\frac{\mu m}{r}$  et on retrouve l'expression de  $H$  donnée par l'équation (15.18).

### 15.1.2. La 1ère loi de Kepler

En multipliant vectoriellement à droite les membres de l'équation (15.5) par  $\mathbf{C} = \mathbf{r} \wedge \mathbf{v}$ , on obtient :

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{r}} \wedge \mathbf{C} &= -\frac{\mu}{r^3} \mathbf{r} \wedge (\mathbf{r} \wedge \mathbf{v}) = -\frac{\mu}{r^3} [\mathbf{r} \wedge (\mathbf{r} \wedge \mathbf{v})] = -\frac{\mu}{r^3} [\mathbf{r} \cdot (\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}) - (\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) \mathbf{v}] \\ &= -\frac{\mu}{r^3} \left( \mathbf{r} r \frac{dr}{dt} - r^2 \mathbf{v} \right) = -\frac{\mu}{r^2} \left( \mathbf{r} \frac{dr}{dt} - r \mathbf{v} \right) \\ &\quad \ddot{\mathbf{r}} \wedge \mathbf{C} = \mu \frac{d}{dt} \left( \frac{\mathbf{r}}{r} \right) \end{aligned} \quad (15.19)$$

1. En hommage à **Sir William Rowan Hamilton** (1805-1865) : mathématicien, physicien et astronome irlandais.

Comme  $\mathbf{C}$  est constant, l'équation (15.19) s'écrit :

$$\frac{d}{dt}(\dot{\mathbf{r}} \wedge \mathbf{C}) - \mu \frac{d}{dt} \left( \frac{\mathbf{r}}{r} \right) = 0$$

Après intégration, on a :

$$\dot{\mathbf{r}} \wedge \mathbf{C} - \mu \frac{\mathbf{r}}{r} = \mathbf{l} = \text{vecteur constant } \mathbf{l}_0$$

ou :

$$(\mathbf{v} \wedge \mathbf{C}) - \mu \frac{\mathbf{r}}{r} = \mathbf{l} \quad (15.20)$$

On appelle  $\mathbf{l}$  vecteur de Laplace. On multiplie l'équation (15.20) par  $\mathbf{r}$ , on obtient :

$$\mathbf{r} \cdot (\mathbf{v} \wedge \mathbf{C}) - \mu \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}}{r} = \mathbf{r} \cdot \mathbf{l} \quad (15.21)$$

Comme :

$$\mathbf{r} \cdot (\mathbf{v} \wedge \mathbf{C}) = \mathbf{v} \cdot (\mathbf{C} \wedge \mathbf{r}) = \mathbf{C} \cdot (\mathbf{r} \wedge \mathbf{v}) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{C} = C^2$$

et :

$$\mathbf{l} \cdot \mathbf{r} = lr \cos v$$

(15.21) devient :

$$C^2 = \mu r + lr \cos v \quad (15.22)$$

En posant :

$$p = \frac{C^2}{\mu} \quad \text{et} \quad e = \frac{l}{\mu} \quad (15.23)$$

on déduit de (15.22) :

$$\boxed{r = \frac{p}{1 + e \cos v}} \quad (15.24)$$

d'où :

**Théorème 15.2 (1ère loi de Kepler)** *L'orbite décrite par le vecteur de position  $\mathbf{r}$  est une conique (ellipse) définie en coordonnées polaires  $(r, v)$ . L'angle  $v$  compté, entre la direction du vecteur de Laplace  $\mathbf{l}$  ou  $\mathbf{OP}$  (périgée) et le rayon vecteur  $\mathbf{r}$ , s'appelle l'anomalie vraie.*

On a :

$$\text{Pour } v = 0 \implies r_1 = \frac{p}{1 + e} \text{ c'est la périgée}$$

$$\text{Pour } v = \pi \implies r_2 = \frac{p}{1 - e} \text{ c'est l'apogée}$$

$$\text{D'où : } r_1 + r_2 = 2a = \frac{2p}{1 - e^2} \implies p = a(1 - e^2)$$

Par suite :

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{p}{1+e} = \frac{a(1-e^2)}{1+e} = a(1-e) \\ r_2 &= \frac{p}{1-e} = \frac{a(1-e^2)}{1-e} = a(1+e) \end{aligned} \quad (15.25)$$

### 15.1.3. La 3ème Loi de Kepler

D'après la 2ème loi de Kepler donnée par (15.15) :

$$\dot{\Sigma} = \frac{d\Sigma}{dt} = \frac{C}{2} = \text{constante}$$

d'où :

$$d\Sigma = \frac{C}{2} dt \quad (15.26)$$

En intégrant (15.26) sur une période, on obtient :

$$\frac{1}{2} \int_0^T C dt = \int d\Sigma = \Sigma = \pi \cdot a \cdot b = \pi \cdot a^2 \sqrt{1-e^2}$$

Soit :

$$C = \frac{2\pi}{T} a^2 \sqrt{1-e^2} \quad (15.27)$$

Comme  $C = \sqrt{p\mu} = \sqrt{a(1-e^2)\mu}$  et  $T$  la période, on a finalement :

$$\boxed{\frac{a^3}{T^2} = \frac{\mu}{4\pi^2} = \text{constante}} \quad (15.28)$$

C'est la 3ème loi de Kepler.

**Théorème 15.3 (3ème loi de Kepler)** *Le carré de la période est proportionnel au cube du demi-grand axe de l'ellipse.*

## 15.2 Eléments de l'orbite

Après l'intégration des équations du mouvement du satellite artificiel, on obtient six paramètres qui définissent la position du plan de l'orbite, ses dimensions, appelés les éléments d'orbite et ce sont :

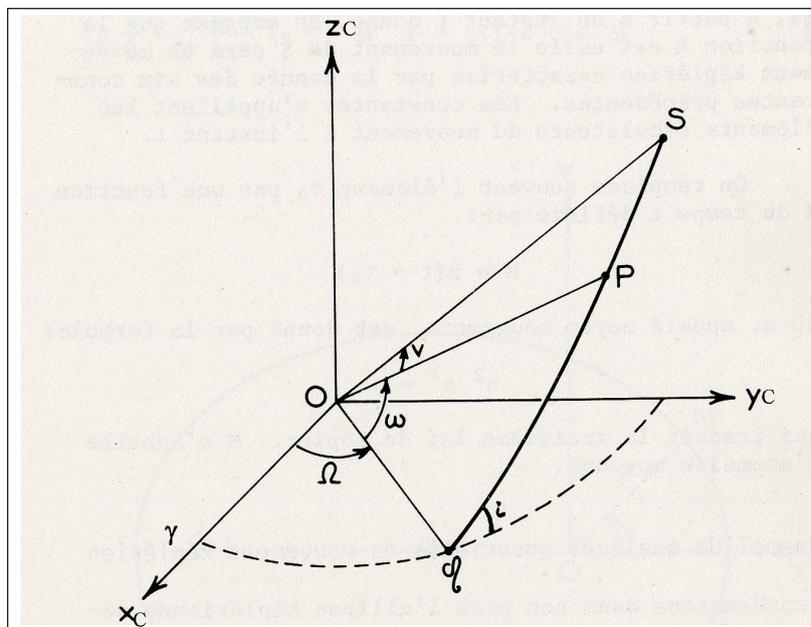


Fig. 15.1 Le repère céleste

- $a$  - le demi-grand axe ;
- $e$  - la première excentricité ;
- $i$  - l'angle d'inclinaison ;
- $\Omega$  - l'ascension droite du noeud ascendant ;
- $\omega$  - l'argument ;
- $t_0$  - l'instant de passage au périhélie.

### 15.2.1. Les Coordonnées

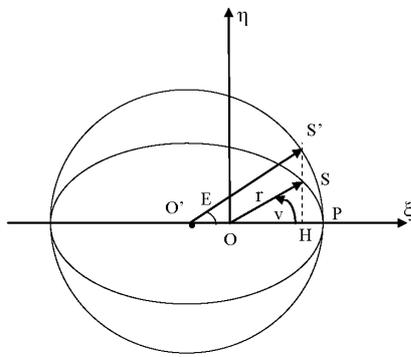
En conséquence de la 3<sup>ème</sup> loi de Kepler (15.28), on peut écrire :

$$n = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} \quad (15.29)$$

$n$  est appelé *vitesse moyenne angulaire*. A partir de (15.29), on définit *l'anomalie moyenne*  $M$  à l'instant  $t$  par :

$$\boxed{M = n(t - t_0)} \quad (15.30)$$

A l'aide de la figure (Fig. 15.2), on va exprimer les coordonnées du satellite dans le plan de l'orbite :



**Fig. 15.2** Plan de l'orbite

où :

- $O$  est le centre de gravité de la terre et aussi un foyer de l'ellipse ;
- $S$  la position du satellite ;
- $v$  l'anomalie vraie ;
- $E$  l'angle  $PO'S'$  est appelé l'anomalie excentrique ;
- l'axe  $Oη$  est perpendiculaire à l'axe  $Oξ$  et l'axe  $Tζ$  est perpendiculaire au plan  $Oξη$ .

On sait que dans le repère  $Oξη$ , on a :

$$\mathbf{OS} \begin{cases} \xi = OS \cos v = r \cos v \\ \eta = OS \sin v = r \sin v \\ \text{avec } r = \frac{p}{1 + e \cos v} \end{cases} \quad (15.31)$$

Maintenant, d'après la première loi de Kepler, l'aire balayée par le vecteur position  $\mathbf{OS}$  entre les instants  $t_0$  et  $t$  vaut :

$$\begin{aligned} \Sigma &= \int_{t_0}^t C dt = \frac{C(t-t_0)}{2} = \frac{(t-t_0)2\pi a^2 \sqrt{1-e^2}}{2T} = \\ &= \frac{n(t-t_0)a^2 \sqrt{1-e^2}}{2} = \frac{Ma^2 \sqrt{1-e^2}}{2} \end{aligned} \quad (15.32)$$

Comme l'ellipse de paramètres  $(a, b)$  est obtenue par affinité de rapport  $k = b/a = \sqrt{1-e^2}$  du cercle centré en  $O'$  et de rayon  $a$ . Donc :

$$k = \frac{\Sigma}{\sigma_1}$$

où la surface  $\sigma_1$  est celle du triangle curviligne  $OPS'$ , elle est égale à la différence du secteur circulaire  $O'PS'$  et du triangle  $O'OS'$  soit :

$$A_1 = \text{aire secteur } O'PS' = \frac{\pi \cdot a^2}{2\pi} \cdot E = \frac{a^2 \cdot E}{2}$$

et l'aire du triangle  $O'OS'$  vaut :

$$A_2 = \frac{O'O \cdot HS'}{2}$$

Comme :

$$\sin E = \frac{HS'}{a} \Rightarrow HS' = a \cdot \sin E, \quad O'O = a - r_1 = a - a(1-e) = a \cdot e$$

d'où :

$$\sigma_1 = A_1 - A_2 = \frac{a^2 E}{2} - \frac{O'O \cdot HS'}{2} = \frac{a^2 E}{2} - \frac{ae \cdot a \sin E}{2} = \frac{a^2 (E - e \sin E)}{2}$$

On peut écrire alors en utilisant (15.32) que :

$$\begin{aligned} \Sigma &= k \sigma_1 \Rightarrow \frac{Ma^2 \sqrt{1-e^2}}{2} = \frac{b a^2 (E - e \sin E)}{2} = \\ &= \frac{\sqrt{1-e^2} a^2 (E - e \sin E)}{2} \Rightarrow E - e \sin E = M = n(t-t_0) \end{aligned}$$

L'équation :

$$\boxed{E - e \sin E = M = n(t - t_0)} \quad (15.33)$$

s'appelle *l'équation de Kepler*.

Cette relation est importante, puisqu'elle permet de calculer  $E$  en fonction du temps et par suite de déterminer  $v = v(t)$  voir l'équation (15.36) ci-dessous, et  $r = r(t)$ .

On peut calculer la valeur de l'anomalie excentrique  $E$  par la méthode itérative. A la première itération, on prend :

$$E_1 = M + e \sin M$$

et :

$$E_2 = E_1 + \delta E$$

En utilisant (15.33), on a :

$$E_1 + \delta E - e \sin(E_1 + \delta E) = M$$

En faisant un développement au premier degré, on obtient :

$$E_1 + \delta E - e \sin E_1 \cos \delta E - e \sin \delta E \cos E_1 = M$$

Comme  $\delta E$  est petit, on a  $\cos \delta E \approx 1$  et  $\sin \delta E \approx \delta E$ , on arrive à :

$$\delta E = \frac{M - E_1 + e \sin E_1}{1 - e \cos E_1} \quad (15.34)$$

On prend maintenant :

$$E_1 = E_1 + \delta E$$

et on applique (15.34) et ainsi de suite jusqu'à ce que  $\delta E$  soit négligeable devant la précision désirée.

Dans le repère  $O\xi\eta\zeta$ , on peut écrire les coordonnées du satellite sous la forme :

$$\boxed{\begin{aligned} \xi &= OH = O'H - O'O = a \cos E - ae = a(\cos E - e) \\ \eta &= SH = (b/a)HS' = \sqrt{1 - e^2} a \sin E = a\sqrt{1 - e^2} \sin E \\ \zeta &= 0 \end{aligned}} \quad (15.35)$$

Ce qui donne :

$$\frac{\eta}{\xi} = \frac{\sqrt{1 - e^2} \sin E}{\cos E - e}$$

Or d'après (15.31), on a :

$$\begin{cases} \xi = r \cos v \\ \eta = r \sin v \end{cases} \implies \operatorname{tg} v = \frac{\eta}{\xi}$$

d'où :

$$\boxed{\operatorname{tg} v = \frac{\sqrt{1-e^2} \sin E}{\cos E - e}} \quad (15.36)$$

On exprime maintenant les coordonnées  $(X_C, Y_C, Z_C)$  du satellite dans le référentiel céleste  $X_C Y_C Z_C$  à l'aide de la figure (Fig.15.1). Il est nécessaire de faire successivement :

1. une rotation de  $-\omega$  autour de l'axe  $O\xi$ ;
2. une rotation de  $-i$  autour de l'axe  $O\Omega$ ;
3. une rotation de  $-\Omega$  autour de l'axe  $O'Z_C$ .

Les matrices de rotations sont les suivantes :

$$R(-\Omega) = \begin{pmatrix} \cos \Omega & -\sin \Omega & 0 \\ \sin \Omega & \cos \Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R(-i) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i & -\sin i \\ 0 & \sin i & \cos i \end{pmatrix}$$

et :

$$R(-\omega) = \begin{pmatrix} \cos \omega & -\sin \omega & 0 \\ \sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

D'où :

$$\begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{pmatrix} = R(-\Omega) \cdot R(-i) \cdot R(-\omega) \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix} \quad (15.37)$$

Ce qui donne après calculs :

$$\begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Omega \cos \omega - \sin \Omega \sin \omega \cos i & -\cos \Omega \sin \omega - \sin \Omega \cos \omega \cos i & \sin \Omega \sin \omega \\ \sin \Omega \cos \omega + \cos \Omega \sin \omega \cos i & -\sin \Omega \sin \omega + \cos \Omega \cos \omega \cos i & -\cos \Omega \sin i \\ \sin i \cdot \sin \omega & \sin i \cdot \cos \omega & \cos i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix}$$

En posant :

$$\begin{aligned} P_X &= \cos \Omega \cos \omega - \sin \Omega \sin \omega \cos i \\ P_Y &= -\cos \Omega \sin \omega - \sin \Omega \cos \omega \cos i \\ Q_X &= \sin \Omega \cos \omega + \cos \Omega \sin \omega \cos i \\ Q_Y &= -\sin \Omega \sin \omega + \cos \Omega \cos \omega \cos i \end{aligned}$$

On obtient comme  $\zeta = 0$  :

$$X_C = P_X \xi + P_Y \eta \quad (15.38)$$

$$Y_C = Q_X \xi + Q_Y \eta \quad (15.39)$$

$$Z_C = \xi \sin i \cdot \sin \omega + \eta \sin i \cdot \cos \omega \quad (15.40)$$

Si on veut calculer les coordonnées du satellite dans le référentiel terrestre  $(O, X_T, Y_T, Z_T)$ , on a :

$$\begin{pmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega & 0 \\ -\sin \Omega & \cos \Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{pmatrix} \quad (15.41)$$

où  $\Omega$  est le temps sidéral de Greenwich au temps  $t$ . Il vaut :

$$\Omega(\text{en heures}) = 1.002737909 \times UT2 + HSG_{0TU} \quad (15.42)$$

avec  $UT2$  le Temps Universel corrigé (en heures) et  $HSG_{0TU}$  l'heure sidérale à Greenwich à 0h TU (Temps Universel).

### 15.3 Les Perturbations des Orbites

On a vu dans le chapitre précédent le mouvement d'un satellite artificiel autour de la terre sous l'action de la force gravitationnelle. Le mouvement réel du satellite est sous l'effet de la force centrale gravitationnelle et d'une force supplémentaire. On supposera que cette force est petite par rapport à la force centrale. On l'appelle force perturbatrice.

Cette force perturbatrice est la somme de forces d'origine gravitationnelle et d'autres non gravitationnelles. Dans le cas général, une force perturbatrice  $\mathbf{f}$  en un point est fonction de ses coordonnées, de sa vitesse et du temps  $t$ . On peut écrire alors :

$$\begin{aligned} f_X &= f_X(X, Y, Z, \dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}, t) \\ f_Y &= f_Y(X, Y, Z, \dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}, t) \\ f_Z &= f_Z(X, Y, Z, \dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}, t) \end{aligned} \quad (15.43)$$

Les équations du mouvement en coordonnées rectangulaires obtenues en complètement les équations du problème de la façon suivante :

$$\begin{aligned}
m\ddot{X}_C + \frac{\mu m}{r^3} X_C &= f_{X_C}(X_C, Y_C, Z_C, \dot{X}_C, \dot{Y}_C, \dot{Z}_C, t) \\
m\ddot{Y}_C + \frac{\mu m}{r^3} Y_C &= f_{Y_C}(X_C, Y_C, Z_C, \dot{X}_C, \dot{Y}_C, \dot{Z}_C, t) \\
m\ddot{Z}_C + \frac{\mu m}{r^3} Z_C &= f_{Z_C}(X_C, Y_C, Z_C, \dot{X}_C, \dot{Y}_C, \dot{Z}_C, t)
\end{aligned} \tag{15.44}$$

Comme une force perturbatrice est d'origine gravitationnelle, elle dérive d'un potentiel qu'on note  $R$  soit :

$$\mathbf{f} = \mathbf{grad}R$$

Alors les équations précédentes s'écrivent :

$$\begin{aligned}
m\ddot{X}_C + \frac{\mu m}{r^3} X_C &= \frac{\partial R}{\partial X_C} \\
m\ddot{Y}_C + \frac{\mu m}{r^3} Y_C &= \frac{\partial R}{\partial Y_C} \\
m\ddot{Z}_C + \frac{\mu m}{r^3} Z_C &= \frac{\partial R}{\partial Z_C}
\end{aligned} \tag{15.45}$$

On fait un changement de variables tel que :

$$h(X_C, Y_C, Z_C, \dot{X}_C, \dot{Y}_C, \dot{Z}_C) = g(a, e, i, \Omega, \omega, M)$$

Le système (15.45) devient un nouveau système différentiel d'ordre 2 de six inconnues de la forme :

$$\begin{aligned}
\dot{a} &= \Phi_a(a, e, i, \Omega, \omega, M, t) \\
\dot{e} &= \Phi_e(a, e, i, \Omega, \omega, M, t) \\
\dot{i} &= \Phi_i(a, e, i, \Omega, \omega, M, t) \\
\dot{\Omega} &= \Phi_\Omega(a, e, i, \Omega, \omega, M, t) \\
\dot{\omega} &= \Phi_\omega(a, e, i, \Omega, \omega, M, t) \\
\dot{M} &= \Phi_M(a, e, i, \Omega, \omega, M, t)
\end{aligned} \tag{15.46}$$

Ces six nouvelles variables sont appelées les éléments osculateurs ou instantanés.

La solution des équations du mouvement est possible par une méthode analytique ou numérique. On peut dire que le satellite se mouve le long de l'orbite keplérienne, mais les éléments de l'orbite sont, dans ce cas, des fonctions du temps. On l'appelle orbite osculateur.

Comme  $\mathbf{f}$  a été supposée petite, la solution du système d'équations des éléments osculateurs se présentera en général sous la forme :

$$\begin{aligned}
a &= a_0 + \delta a \\
e &= e_0 + \delta e \\
i &= i_0 + \delta i \\
\Omega &= \Omega_0 + \delta \Omega \\
\omega &= \omega_0 + \delta \omega \\
M &= M_0 + \delta M
\end{aligned}
\tag{15.47}$$

où  $\delta a, \delta e, \delta i, \delta \Omega, \delta \omega, \delta M$  seront des petites quantités. Elles sont appelées les perturbations des éléments de l'orbite. L'intérêt de l'emploi des variables oscultrices est que la solution est exprimée sous la forme d'un petit complément à des quantités fixes.

#### 15.4 L'Influence du champ de la pesanteur sur le Mouvement du Satellite Artificiel

Un point  $M(X, Y, Z)$  de masse unité est soumis au potentiel  $V$  de gravitation et au potentiel  $\Phi$  de la force centrifuge due à la rotation de la terre.

L'expression de  $V$  est :

$$V = G \iiint_{Terre} \frac{dm'}{r}$$

Malheureusement, cette expression n'est pas calculable car on ignore la distribution des masses à l'intérieur de la Terre. Il faut appliquer un développement de  $V$  en fonctions sphériques sous la forme suivante :

$$\boxed{V = \frac{\mu}{r} \sum_{n=0}^{+\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin\varphi)}
\tag{15.48}$$

où :

- $C_{nm}, S_{nm}$  : sont les coefficients qu'on obtient par l'observation et ils sont connus ;
- $P_{nm}(\sin\varphi)$  : on les appelle les harmoniques sphériques ou polynômes de Legendre de deuxième espèce.

Les interprétations des premiers coefficients sont données par :

$$\begin{cases} C_{00} = 1 \\ C_{10} = \frac{Z_C}{a}, \quad C_{11} = \frac{X_C}{a}, \quad S_{11} = \frac{Y_C}{a} \end{cases} \quad (15.49)$$

et :

$$\begin{cases} C_{20} = -\frac{A+B}{2Ma^2} + \frac{C}{Ma^2} \\ C_{21} = \frac{E}{Ma^2}, \quad C_{22} = \frac{B-A}{4Ma^2} \\ S_{21} = \frac{D}{Ma^2}, \quad S_{22} = \frac{F}{Ma^2} \end{cases} \quad (15.50)$$

où :

- $(X_C, Y_C, Z_C)$  les coordonnées du centre de la masse terrestre ;
- $A, B, C$  les moments d'inertie principaux de la Terre ;
- $D, E, F$  les moments produits d'inertie ;
- $M$  la masse de la Terre ;
- $a$  le demi-grand axe de l'ellipsoïde terrestre.

Dans le cas où la Terre est représentée par un ellipsoïde de révolution,  $V$  est indépendant de la longitude et  $V$  s'écrit :

$$V = \frac{\mu}{r} \left[ 1 + \sum_{n=2}^{+\infty} \left( \frac{a}{r} \right)^n C_{n0} P_n(\sin\varphi) \right] \quad (15.51)$$

avec :

$$C_{20} = \frac{C-A}{Ma^2} = -\frac{2}{3} \left( \alpha - \frac{1}{2}q - \frac{1}{2}\alpha^2 + \frac{1}{7}q\alpha \right)$$

$$q = \frac{\varpi^2 a^3 (1-\alpha)}{\mu}$$

$\alpha = (b-a)/a$  l'aplatissement de l'ellipsoïde terrestre et  $\varpi$  la vitesse angulaire de la rotation de la Terre.

Dans ce cas, on considère le système de coordonnées localisé au centre de la masse terrestre et l'axe  $OZ$  confondu avec l'axe de rotation. En conséquence, on a :

$$\begin{aligned} X_C &= Y_C = Z_C = 0 \\ A &= B \text{ et } D = E = 0 \end{aligned}$$

On a aussi tous les coefficients harmoniques tesseraux et sectoriaux nuls :

$$C_{10} = C_{11} = S_{11} = C_{21} = S_{21} = 0$$

On peut mettre :

$$J_n = -C_{n0} \quad (15.52)$$

On obtient alors la formule suivante (B. Morando, 1974) :

$$V = \frac{\mu}{r} \left[ 1 - \sum_{n=2}^{+\infty} \left( \frac{a}{r} \right)^n J_n P_n(\sin \varphi) \right] \quad (15.53)$$

## 15.5 Exercices et Problèmes

**Exercice 15.1** 1. Montrer que :  $r = a(1 - e \cos E)$ .

2. Démontrer à partir des formules du cours la relation :

$$\operatorname{tg} \frac{v}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \operatorname{tg} \frac{E}{2}$$

Aide : exprimer  $\operatorname{tg}(v/2)$  en fonction de  $\operatorname{tg} v$ .

**Exercice 15.2** A partir de l'expression de  $X_C$ , montrer que  $X_C$  vérifie l'équation du mouvement non perturbé pour la composante  $X$ , soit :

$$\ddot{X}_C + \frac{\mu}{r^3} X_C = 0$$

**Exercice 15.3** Les altitudes d'un satellite artificiel au périhélie et à l'apogée sont respectivement 200 km et 500 km.

1. Donner les valeurs des paramètres de l'orbite  $a, b, p$  et  $e$ .

2. Calculer les vitesses au périhélie et à l'apogée  $v_p$  et  $v_a$ .

**Problème 15.1** La Terre est supposée sphérique, homogène de rayon  $R = 6371000 \text{ m}$ . Le produit de la constante universelle de gravitation terrestre  $G$

par la masse  $M$  de la Terre soit  $GM = 3.986\,005\,10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ . Un satellite géodésique a une trajectoire telle que son altitude maximale est 1100 km et son altitude minimale 800 km.

1. Donner la période de ce satellite.
2. Quelle est l'excentricité de sa trajectoire ?
3. On mesure la distance du satellite à une station au sol de latitude  $43^{\circ} \frac{1}{2}$  et d'altitude nulle, lors du passage du satellite à la verticale de la station, soit  $D = 812\,000 \text{ m}$ .
  - a - Quelle est l'anomalie vraie du satellite à cet instant, sachant qu'il vient de passer au périhélie.
  - b - Combien de temps s'est écoulé depuis le passage au périhélie ?

**Problème 15.2** Une comète décrit autour du Soleil une ellipse d'excentricité  $e$  et de demi-grand axe  $a$  et de demi-petit axe  $b$  où le Soleil occupe un des foyers. L'équation de l'orbite de la comète en coordonnées polaires est donnée par :

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos v}$$

avec  $r$  la distance Soleil- comète.

1. Déterminer les distances  $r_A$  et  $r_P$  lorsque la comète est à l'apogée et au périhélie en fonction de  $a$  et  $e$ .
2. La comète de Halley a une orbite fortement excentrique : son apogée est à 0.53 UA du Soleil et sa périhélie est à 35.1 UA. Calculer  $e$ .
3. En utilisant la loi des aires et la troisième loi de Kepler, montrer que la constante des aires  $C$  est exprimée par :

$$C^2 = \frac{b^2}{a} G.M$$

où  $G, M$  désignent respectivement la constante de la gravitation universelle et la masse du Soleil.

4. On pose :  $u = \frac{1}{r}$ . Donner l'expression du carré de la vitesse  $v^2$  de la comète en fonction de  $u$  et  $\frac{du}{dv}$ . Montrer que  $v^2$  peut s'écrire sous la forme :

$$v^2 = G.M \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)$$

5. Déterminer l'expression du rapport des vitesses à l'apogée et au périhélie  $\frac{v_A}{v_P}$  en fonction de  $e$ .

6. Calculer numériquement ce rapport pour le cas de la comète de Halley.

On donne :

$$- 1 \text{ UA} = 149\,597\,870 \text{ km} ;$$

$$- G = 6.672 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} ;$$

$$- M = 1.9891 \times 10^{30} \text{ kg}.$$

**Problème 15.3** Soient deux corps  $\mathbf{X}_1(m_1)$  et  $\mathbf{X}_2(m_2)$  soumis à l'attraction universelle dans un repère orthonormé  $\mathcal{R}(O, e_1, e_2, e_3)$ . On pose :

$$\mathbf{OM}_1 = \mathbf{X}_1(m_1)$$

$$\mathbf{OM}_2 = \mathbf{X}_2(m_2)$$

avec  $\mu$  la constante universelle de la gravitation.

1. Montrer que les équations du mouvement des points  $M_1, M_2$  dans  $\mathcal{R}$  sont données par :

$$\frac{d^2 \mathbf{X}_1}{dt^2} = -\mu m_2 \frac{(\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1)}{\|\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1\|^3}$$

$$\frac{d^2 \mathbf{X}_2}{dt^2} = -\mu m_1 \frac{(\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2)}{\|\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1\|^3}$$

2. Soit  $\mathcal{G}$  le centre de gravité des deux corps  $M_1, M_2$ . Montrer que  $\mathcal{G}$  vérifie :

$$\mathbf{OG} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \mathbf{OM}_1 + \frac{m_2}{m_1 + m_2} \mathbf{OM}_2$$

En déduire que le mouvement de  $\mathcal{G}$  est rectiligne et uniforme dans  $\mathcal{R}$ .

3. On pose  $m = m_1 + m_2$ ,  $\alpha = \frac{m_1}{m}$ . En déduire que :  $\frac{d^2 \mathbf{X}_2}{dt^2} = \frac{-\alpha}{1-\alpha} \frac{d^2 \mathbf{X}_1}{dt^2}$ .

4. On note :

$$\mathbf{Y}_1 = \mathbf{X}_1 - \mathbf{OG}$$

$$\mathbf{Y}_2 = \mathbf{X}_2 - \mathbf{OG}$$

Montrer qu'on a :

$$\frac{d^2 \mathbf{Y}_2}{dt^2} = \frac{-\alpha}{1-\alpha} \frac{d^2 \mathbf{Y}_1}{dt^2}$$

$$\frac{d^2 \mathbf{Y}_1}{dt^2} = -\mu m(1-\alpha)^3 \frac{\mathbf{Y}_1}{\|\mathbf{Y}_1\|^3}$$

5. *Quel est le mouvement de  $M_2$ .*



# Chapitre 16

## *Le Système GPS*

### 16.1 Introduction

Le système de positionnement global (Global Positioning System GPS), appelé aussi NAVSTAR/GPS (Navigation System by Timing And Ranging), est un système de navigation par repérage du temps et mesures des distances, et c'est un système mondial de positionnement par satellites conçu et mis en service par le Département Américain de la Défense (DoD). Il détermine la position des points au sol équipés de récepteurs enregistrant des mesures d'origine satellitaire.

Il a été développé en vue du remplacement du système de positionnement TRANSIT (Doppler) qui présentait deux défauts importants :

- une couverture satellitaire insuffisante ;
- une faible précision en navigation.

Les spécifications initiales sont d'avoir accès à une position absolue dans un système de référence mondial avec une précision métrique et au temps avec la précision de la microseconde.

Le développement du système GPS a commencé dans les années 70, la mise en place démarrant en 1978 par le lancement du premier satellite. Le système a été déclaré opérationnel par le DoD début février 1994. Depuis 52 satellites ont été lancés.

## 16.2 Aspects Généraux

### 16.2.1. Les Satellites

Le système complet comporte 34 satellites dont 31 sont opérationnels. Ils sont répartis de façon à assurer en tout lieu une visibilité simultanée de 4 à 8 satellites avec une élévation d'au moins  $15^\circ$  au dessus de l'horizon.

Les satellites sont répartis sur 6 plans orbitaux, ayant tous une inclinaison d'environ  $55^\circ$  sur l'équateur. L'orbite des satellites est quasi-circulaire, leur altitude est d'environ 20 000 km et leur période d'environ 12 heures.

Chaque satellite est muni d'un émetteur-récepteur, d'une horloge de haute précision, d'ordinateurs et d'équipements auxiliaires destinés au fonctionnement du système. On distingue cinq classes de satellites qui correspondent chacune à une étape dans la constitution du système :

\* Le *Block I* : 11 satellites lancés entre 1978 et 1985. Cet ensemble a constitué la phase initiale de test du système. Aucun satellite de ce bloc n'est utilisé à l'heure actuelle.

\* Le *Block IIA* : le premier a été lancé en avril 1991. Un seul satellite est en activité.

\* Le *Block IIR* : comprenant 11 satellites lancés entre 1997 et 2004 munis d'horloges en rubidium.

\* Le *Block IIR-M* est constitué de 7 satellites, lancés entre septembre 1997 et novembre 2009. Les derniers satellites émettent le deuxième signal civil L2C sur la fréquence L2.

\* Le *Block IIF* est constitué de 12 satellites dont le premier a été lancé en 2010 en émettant en plus le deuxième signal civil L2C et le troisième signal civil L5. Le dernier a été lancé en février 2016. La durée de vie de ces satellites est de 12 ans.

\* Trois satellites sont en réserve.

Le premier satellite de GPS III, la nouvelle génération des satellites GPS, serait lancé probablement en 2018.

Un secteur de contrôle composé de 5 stations au sol (Hawaii, Colorado Springs, Ascencion, Diago Garcia et Kwajalein) qui enregistrent en continu les signaux

GPS sur les deux fréquences L1, L2 et sur la fréquence L2C (pour les satellites du *Block IIR-M* et du *Block IIF*) et la fréquence L5 (pour les satellites du *Block IIF*). Les tâches du secteur de contrôle sont :

- capter les satellites GPS ;
- analyser les orbites et prédire ;
- mettre à jour les messages de navigation.

Le secteur de contrôle se compose de :

- *Monitor station* (MS) : on observe les éphémérides et l'horloge,
- *Master control station* (MCS) située à Colorado Springs où on effectue les opérations suivantes :
  - \* les calculs des erreurs ;
  - \* les corrections de l'orbite et la fréquence d'horloge ;
  - \* la création de nouveaux messages de navigation ;
- *Upload station* (antennes sur terre) : on y envoie vers les satellites les messages de navigation.

### **16.2.2. Le Message GPS**

Les satellites émettent en permanence deux signaux ultra-stables sur les deux fréquences spécifiques du système L1 et L2. Sur ces deux fréquences, est modulé un code particulier dont le décodage fournit le message GPS.

Ce message se compose des éléments suivants :

- prévisions de l'orbite des satellites, provenant des stations de contrôle, afin de permettre aux utilisateurs d'effectuer des calculs de navigation en temps réel ;
- l'information concernant la qualité des horloges des différents satellites et le modèle de développement polynomial du comportement de ces horloges ;
- information d'ordre général sur le système.

### 16.2.3. Protection du Système GPS

Le système GPS était pourvu de deux processus qui permettent de limiter son utilisation civile et de protéger son utilisation militaire :

- \* L'accès sélectif (SA : Selective Availability) comporte deux dégradations :
  - dégradation de la fréquence de l'horloge des satellites par ajout d'un déphasage ;
  - dégradation des éléments du message radiodiffusé (éphémérides des satellites, paramètres d'horloge des satellites).

Ces dégradations étaient connues et diffusées uniquement à des utilisateurs autorisés.

- \* L'antibrouillage (AS : Anti-Spoofing) est une protection destinée à éviter le brouillage volontaire du système GPS par un utilisateur qui enverrait un signal proche de celui de GPS, créant ainsi la confusion et des erreurs de positionnement pour les autres utilisateurs.

Ces deux protections ont été levées.

## 16.3 Les Instruments de mesures GPS

Pour optimiser l'utilisation du GPS, une gamme très variée de récepteurs a été mise en œuvre. Chaque type de récepteurs a ses spécifications :

- \* GPS portatif : dans ce type d'instrument, il existe plusieurs modèles ;
- \* poids varie de 397 g à 850 g ;
- \* précision :
  - mesure absolue : 15 à 100 m ;
  - mesure différentielle : 2 à 3m ;
- \* détermination de la position en deux dimensions avec trois satellites ou en mode de mesures à 3 dimensions (position et altitude avec 4 satellites) ;
- \* GPS stationnaire : ce type d'instrument permet d'obtenir une meilleure précision que les instruments portatifs. On distingue suivant le mode de fixation du récepteur :

- GPS fixé sur trépied : il permet de faire des mesures satellitaires en mode statique et statique rapide ;
- GPS mobile : l'antenne est fixée sur une tige. Il permet de réaliser le mode STOP and GO. Mais pour réaliser le temps réel, il nécessite un équipement radio supplémentaire qui permet à un poste fixe d'envoyer sa position à l'autre utilisateur.

### ***16.3.1. Les Récepteurs Géodésiques***

Les récepteurs géodésiques GPS sont des appareils qui enregistrent le message des satellites par l'intermédiaire d'une antenne stationnée sur un point dont on veut connaître la position. Par un processus basé essentiellement sur la connaissance du code qui module le signal reçu, les récepteurs effectuent les mesures GPS.

Ils décodent par eux-mêmes les messages provenant des satellites.

Il existe essentiellement deux types de récepteurs :

- les récepteurs mono-fréquences qui n'enregistrent que les signaux de la fréquence L1 ;
- les récepteurs bi-fréquences qui enregistrent les signaux des deux fréquences L1 et L2.

## **16.4 Principes de mesures GPS**

Les satellites émettent des signaux qui sont reçus, interprétés par des récepteurs au sol. A partir d'une fréquence fondamentale (10.23 MHz), l'émetteur génère deux ondes L1 et L2 de fréquence respectivement 1575.42 MHz et 1227.60 MHz.

L1 et L2 sont modulées par des codes aléatoires (code C/A et code P) ainsi que par un message qui contient en particulier les données sur les éphémérides du satellite. Sur l'onde L1 on trouve le code C/A et le code P, tandis que sur L2, il n'y a que le code P. Le message existe sur les deux ondes.

Le récepteur génère une ou deux ondes qui sont une réplique des ondes L1 et L2 émises par le satellite, ainsi que le code C/A et le code P. Les mesures consistent à comparer cette réplique synthétisée avec le signal reçu soit en mesurant le décalage en temps sur les codes, soit la différence de phases sur les ondes porteuses.

Les mesures sur les codes donnent directement la distance satellite - récepteur en connaissant la durée de propagation du signal émis par le satellite jusqu'à son arrivée à un récepteur sur la terre.

## 16.5 Les Equations Fondamentales d'Observations

### 16.5.1. L'Equation d'Observations en Pseudo-Distances

La mesure de la pseudo-distance est l'observation GPS de base pour tout récepteur. Elle utilise les codes C/A et P. La mesure enregistre le temps apparent  $\Delta t$  mis par le signal pour arriver du satellite au récepteur :

$$\Delta t = t_R - t^S = (t_{R(GPS)} - \delta_R) - (t^{S(GPS)} - \delta^S) = \Delta t_0 + \Delta \delta$$

où  $\Delta t_0$  désigne le temps vrai et :

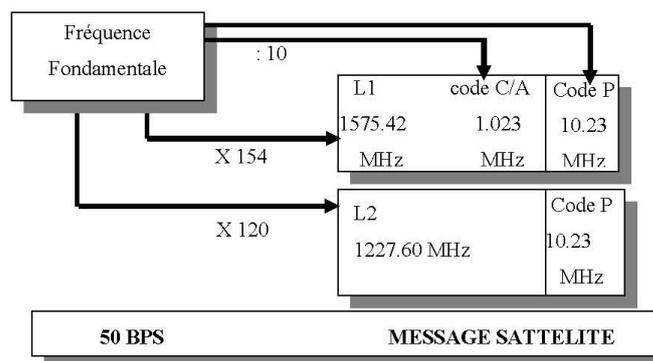


Fig. 16.1 Les fréquences du GPS

$$\Delta\delta = \delta^S - \delta_R$$

la différence entre les corrections aux temps du récepteur et du satellite. L'intervalle  $\Delta t$  ci-dessus est multiplié par la vitesse de la lumière  $c$  pour avoir une distance :

$$R = c\Delta t = c.\Delta t_0 + c\Delta\delta = \rho + c\delta$$

Si la position du satellite est représentée par le vecteur  $\mathbf{r}$  et celle du récepteur par  $\mathbf{R}$ , la vraie distance  $\rho$  peut être calculée à partir de :

$$\rho = \|\mathbf{r} - \mathbf{R}\|$$

Si l'erreur sur l'orbite du satellite est notée par  $d\rho$  et si on prend compte des retards dus au passage du signal dans la troposphère et l'ionosphère, alors la pseudo-distance peut être calculée par l'équation :

$$\boxed{R = \rho + d\rho + c\Delta\delta + \Delta\rho_{ion} + \Delta\rho_{trop}} \quad (16.1)$$

### 16.5.2. L'Equation d'Observation de Phases

Notons  $\varphi^S(t)$  la phase de l'onde reçue avec la fréquence  $f^S$  et  $\varphi_R(t)$  la phase générée par le récepteur avec la fréquence  $f_R$ . Ici le temps  $t$  est une époque dans le temps *GPS* compté à partir d'un instant initial  $t_0 = 0$ , alors on peut écrire que :

$$\begin{aligned} \varphi^S(t) &= f^S \left( t - \frac{\rho}{c} \right) - \varphi_0^S \\ \varphi_R(t) &= f_R \cdot t - \varphi_{0R} \end{aligned}$$

Les phases initiales  $\varphi_0^S$  et  $\varphi_{0R}$  sont causées par les erreurs des horloges du satellite et du récepteur et elles sont égales à :

$$\begin{aligned} \varphi_0^S &= f^S \cdot \delta^S \\ \varphi_{0R} &= f_R \cdot \delta_R \end{aligned}$$

Par suite, la phase de battement est égale à :

$$\varphi_R^S(t) = \varphi^S(t) - \varphi_R(t) = -f^S \cdot \frac{\rho}{c} - f^S \cdot \delta^S + f_R \cdot \delta_R + (f^S - f_R) \cdot t \quad (16.2)$$

Comme les fréquences  $f^S$  et  $f_R$  sont presque les mêmes, l'équation (16.2) peut s'écrire :

$$\varphi_R^S(t) = -f \cdot \frac{\rho}{c} - f \cdot \Delta\delta \quad (16.3)$$

avec  $\Delta\delta = \delta^S - \delta_R$ .

A l'époque  $t$ , la phase de battement est :

$$\varphi_R^S(t) = \left[ \Delta\varphi_R^S(t) \right]_{t_0}^t = \Delta\varphi_R^S(t) + N \quad (16.4)$$

où  $N$  désigne le nombre de cycles entre le satellite et le récepteur.  $N$  est appelé aussi ambiguïté entière. Tant que le récepteur reçoit le signal du satellite,  $N$  reste le même et  $\Delta\varphi_R^S(t)$  est la fraction de phase mesurée depuis le début de la réception du signal.

On pose :

$$\Phi = -\Delta\varphi_R^S(t) \quad (16.5)$$

Alors l'équation (16.5) devient :

$$\Phi = f \cdot \frac{\rho}{c} + f \cdot \Delta\delta + N \quad (16.6)$$

En introduisant la longueur d'onde  $\lambda$ , l'équation (16.6) devient :

$$\boxed{\Phi = \frac{\rho}{\lambda} + c \cdot \frac{\Delta\delta}{\lambda} + N} \quad (16.7)$$

L'équation (16.7) représente l'équation d'observations de phases.  $\rho$  désigne la distance entre le récepteur et le satellite. La phase peut être mesurée mieux que 0.01 cycles ce qui correspond à une précision millimétrique. En effet, de (16.7), on peut écrire que :

$$\lambda d\Phi = 24 \text{ cm} \times 0.01 = 0.24 \text{ cm} = 2.4 \text{ mm} \quad (16.8)$$

où on a considéré que la longueur d'onde  $\lambda = 24 \text{ cm}$ .

### 16.5.3. Le Référentiel WGS84

Le GPS fournit les coordonnées géodésiques  $(\phi, \lambda, h_e)$  dans le système géocentrique WGS84 (World Geodetic System 84)  $(O, X, Y, Z)$ .

Il est défini par :

- l'origine :  $O$  centre des masses de la Terre ;
- l'axe  $OZ$  : parallèle à la direction de l'origine vers le Pôle Conventionnel Terrestre (PCT) ;
- l'axe  $OX$  : le plan  $OZX$  est parallèle au méridien de longitude zéro défini par le Bureau International de l'Heure (BIH) ;
- l'axe  $OY$  : dans l'équateur du PCT et perpendiculaire au plan  $OZX$  dans le sens direct.

Au référentiel  $WGS84$ , on associe l'ellipsoïde  $WGS84$  dont les paramètres sont :

- $a$  le demi-grand axe :  $6378137.00\text{ m}$  ;
- l'aplatissement  $f = 1/298.257223563$ .

Au lieu d'utiliser l'ellipsoïde  $WGS84$ , on utilise l'ellipsoïde  $GRS80$  adopté par l'Association Internationale de Géodésie (AIG) ayant le même demi-grand axe que le  $WGS84$  et un aplatissement de  $1/298.257222101$ .

#### ***16.5.4. Les Coefficients de précision des dispositions des satellites GPS***

Comme en levés topographiques classiques où le géomètre opère des observations, le cas d'un relèvement, en visant des points connus bien disposés, les observations convenablement exécutées des observations GPS obéissent à cette règle.

En effet, on définit les coefficients de précision relatifs à la disposition des différents satellites par rapport au point de l'observation. Ces coefficients permettent de donner à l'opérateur le choix de la période des observations où les satellites GPS sont bien disposés dans le ciel de façon à obtenir des précisions meilleures. Ces coefficients sont notés comme suit :

$GDOP$ : le coefficient de précision géométrique	(16.9)
$PDOP$ : le coefficient de précision de position	
$HDOP$ : le coefficient de précision horizontale	
$VDOP$ : le coefficient de précision verticale	
$TDOP$ : le coefficient de précision du temps	

Comment sont calculés ou estimés ces coefficients ?

A partir des équations fondamentales d'observations GPS (16.1) ou (16.7), on arrive au système suivant, pour les observations GPS en un point  $A$  de coordonnées approchées tridimensionnelles  $(X_0, Y_0, Z_0)$  ou géodésiques  $(\varphi_0, \lambda_0, h_0)$  :

$$A.U = B + V \quad (16.10)$$

où :

- $U = (dX, dY, dZ, \Delta\delta)^T$  le vecteur des corrections à la position approchée  $(X_0, Y_0, Z_0)$  et  $\Delta\delta$  la correction du temps ;
- $A$  la matrice des coefficients ;
- $B$  le vecteur des observations ;
- et  $V$  le vecteur des résidus.

La solution de (16.10) par la méthode des moindres carrés (voir (??)) est donnée par :

$$\bar{U} = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (16.11)$$

La matrice  $Q = (A^T A)^{-1}$ , qu'on appelle la matrice de variance des inconnues, s'écrit sous la forme :

$$Q = \begin{pmatrix} q_{XX} & q_{XY} & q_{XZ} & q_{Xt} \\ q_{YX} & q_{YY} & q_{YZ} & q_{Yt} \\ q_{ZX} & q_{ZY} & q_{ZZ} & q_{Zt} \\ q_{tX} & q_{tY} & q_{tZ} & q_{tt} \end{pmatrix} \quad (16.12)$$

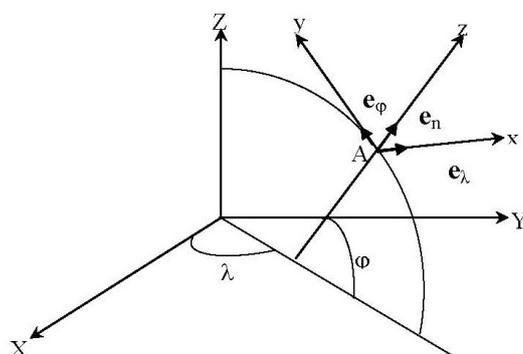
D'où les expressions de :

$$\boxed{\begin{aligned} GDOP &= \sqrt{q_{XX} + q_{YY} + q_{ZZ} + q_{tt}} \\ PDOP &= \sqrt{q_{XX} + q_{YY} + q_{ZZ}} \\ TDOP &= \sqrt{q_{tt}} \end{aligned}} \quad (16.13)$$

Ces coefficients sont définis car la matrice  $Q$  est définie positive. Pour donner les expressions de  $HDOP$  et  $VDOP$ , on doit se ramener au repère local du point  $A$ .

### 16.5.4.1. Le Repère local

Soit un point  $A(\varphi, \lambda, he)$  relatif à un ellipsoïde de révolution associé à un référentiel géocentrique donné  $\mathcal{R}$ .



**Fig. 16.2** Le repère local

On considère le repère orthonormé local en  $A$   $(e_\lambda, e_\varphi, e_n)$  défini dans la base orthonormée  $(i, j, k)$  de  $\mathcal{R}$  (**Fig. 16.2**) par :

$$e_\lambda = \begin{pmatrix} -\sin\lambda \\ \cos\lambda \\ 0 \end{pmatrix} ; \quad e_\varphi = \begin{pmatrix} -\sin\varphi\cos\lambda \\ -\sin\varphi\sin\lambda \\ \cos\varphi \end{pmatrix} ; \quad e_n = \begin{pmatrix} \cos\varphi\cos\lambda \\ \cos\varphi\sin\lambda \\ \sin\varphi \end{pmatrix} \quad (16.14)$$

Matriciellement, on peut écrire (16.14) sous la forme :

$$\begin{pmatrix} e_\lambda \\ e_\varphi \\ e_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\sin\varphi\cos\lambda & -\sin\varphi\sin\lambda & \cos\varphi \\ \cos\varphi\cos\lambda & \cos\varphi\sin\lambda & \sin\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i \\ j \\ k \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} i \\ j \\ k \end{pmatrix} \quad (16.15)$$

avec  $R$  la matrice :

$$R = \begin{pmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\sin\varphi\cos\lambda & -\sin\varphi\sin\lambda & \cos\varphi \\ \cos\varphi\cos\lambda & \cos\varphi\sin\lambda & \sin\varphi \end{pmatrix} \quad (16.16)$$

Soit un vecteur de composantes  $W = (X, Y, Z)^T$  et  $w = (x, y, z)^T$  respectivement par rapport aux bases  $(i, j, k)$  et  $(e_\lambda, e_\varphi, e_n)$ , on a alors la relation :

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\sin\varphi\cos\lambda & -\sin\varphi\sin\lambda & \cos\varphi \\ \cos\varphi\cos\lambda & \cos\varphi\sin\lambda & \sin\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

ou encore :

$$w = R.W$$

Or d'après la formule (??), la matrice de variance  $Q_w$  de  $w$  s'écrit :

$$Q_w = RQ_W.R^T \quad (16.17)$$

#### 16.5.4.2. Calcul de HDOP et VDOP

Pour calculer *HDOP* et *VDOP*, on exprime la matrice  $Q'$  extraite de la matrice  $Q$  donnée par (16.12) soit :

$$Q' = \begin{pmatrix} q_{XX} & q_{XY} & q_{XZ} \\ q_{YX} & q_{YY} & q_{YZ} \\ q_{ZX} & q_{ZY} & q_{ZZ} \end{pmatrix} \quad (16.18)$$

On calcule alors la matrice transformée de  $Q'$  par (16.17), d'où :

$$Q'' = R.Q'.R^T = \begin{pmatrix} q''_{xx} & q''_{xy} & q''_{xz} \\ q''_{yx} & q''_{yy} & q''_{yz} \\ q''_{zx} & q''_{zy} & q''_{zz} \end{pmatrix} \quad (16.19)$$

Par suite :

$$\boxed{\begin{aligned} HDOP &= \sqrt{q''_{xx} + q''_{yy}} \\ VDOP &= \sqrt{q''_{zz}} \end{aligned}} \quad (16.20)$$

Là aussi, les coefficients *HDOP* et *VDOP* sont définis car la matrice  $Q''$  est aussi définie positive.

## 16.6 Les Différents types de Positionnement Par GPS

### 16.6.1. *Le Positionnement Absolu*

Le positionnement absolu d'un point est le processus de collection de données à partir de plusieurs satellites en un endroit donné, constamment avec une éphéméride, pour déterminer la position d'une station indépendante.

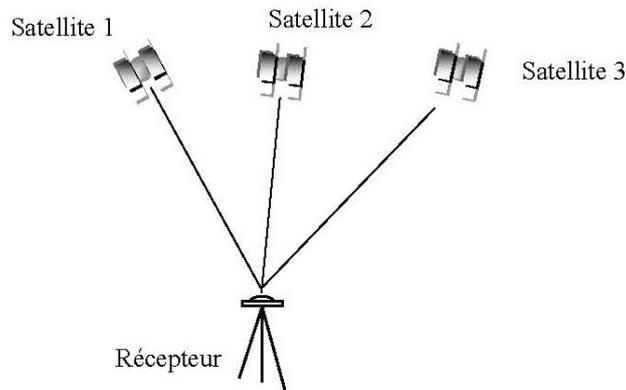
L'utilisateur muni d'un récepteur mesure la distance entre sa station et plusieurs satellites à l'aide du code C/A ou P. L'intérêt de cette méthode est l'obtention d'une position instantanée en temps réel.

- Précision : - 8 mètres avec le code C/A et S/A inactivé (théoriquement) ;
- 40 mètres avec le code C/A et S/A activé ;
- 8 mètres avec le code P.
- Les besoins :
  - \* 4 heures d'observations par session ;
  - \* 2 à 3 sessions par emplacement ;
  - \* avec un récepteur bi-fréquence (L1/L2) ;
  - \* éphémérides précises ;
  - \* un logiciel de traitement.

### 16.6.2. *Le Positionnement Relatif*

C'est un processus de collection de données simultanément en deux ou plusieurs stations, à partir d'au moins quatre satellites, pour déterminer les positions des points relativement à d'autres points connus. Le positionnement des points est relatif d'un point à un autre.

La distance est calculée soit à partir du code P ou C/A, soit à partir de mesures de phases. Ce positionnement permet de diminuer l'influence des erreurs d'orbites, des corrections de propagation, des décalages des horloges satellites et récepteurs.

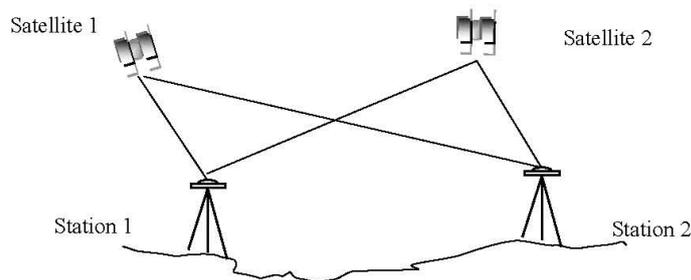


**Fig. 16.3** Positionnement absolu

Le positionnement peut être statique ou dynamique (en général un poste fixe, un mobile). Le temps réel peut être réalisé par ajout d'un équipement de transmission radio qui permet à un poste d'envoyer ses observations à l'autre qui peut alors calculer la position et la vitesse du mobile.

Le champ d'utilisation est vaste allant de la navigation à l'établissement de réseaux de précision (géodésie, topographie,...etc).

Procédures : \* double différence (deux satellites), les stations observent les satellites simultanément à un instant  $t$ .



**Fig. 16.4** Positionnement relatif(double différence)

\* triple différence (2×double différence), les stations observent les satellites à un instant  $t$  puis à un instant  $t + 1$ .

Précision :

- observations en mode statique 2 à 3mm ;
- observations en mode cinématique 2 à 3cm.

### 16.6.3. La Navigation Différentielle DGPS

La navigation différentielle ou le GPS différentiel (DGPS) consiste à faire des observations de pseudo distances en plusieurs stations simultanément.

Le premier type d'application du DGPS est dynamique, c'est à dire une station fixe appelée station de référence et l'autre est mobile. La station fixe dont les coordonnées sont connues envoie, à l'aide d'un équipement radio (UHF, VHF, HF, MF), des corrections à la station mobile qui calcule alors sa position. Ce type de positionnement est très utilisé en navigation maritime à l'approche des côtes ainsi que pour l'hydrographie. Le deuxième type d'application est statique et profite de la bonne précision du DGPS pour l'établissement de réseaux de points dont la précision n'a pas besoin d'être meilleure qu'un mètre.

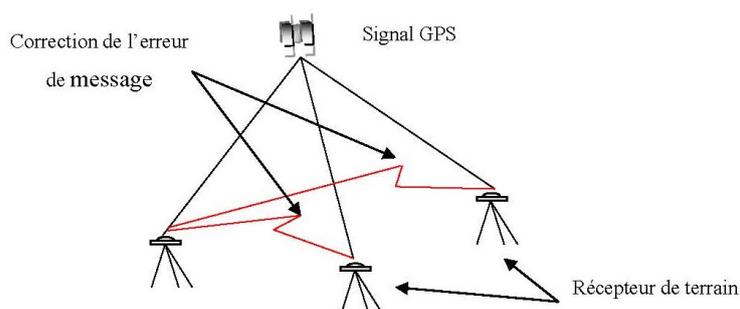


Fig. 16.5 Postionnement relatif (Triple différence)

#### 16.6.4. Le Mode Statique Absolu

Le statique est le mode le plus utilisé par la technique GPS pour l'établissement de canevas ou réseaux en géodésie, topométrie et photogrammétrie. Il s'agit d'observer sur chaque station les phases sur au moins 4 satellites, le résultat est un positionnement relatif, c'est-à-dire un positionnement par rapport à une station de référence en connaissant  $Dx, Dy$ . Le temps d'observations doit être suffisant pour résoudre les ambiguïtés et dépend de la longueur de la ligne de base, de la géométrie de la constellation des satellites et des conditions atmosphériques. Par expérience, la durée d'observations est d'au moins une heure pour des lignes de bases courtes (15 km) et elle est de plusieurs heures pour les lignes de longues bases.

La précision dépend du type de récepteurs (mono ou bi-fréquence), du nombre de récepteurs et du type d'orbites utilisées :

\* GPS statique mono fréquence :

- mesures de phases sur L1 ;
- durée d'observations : une heure ;
- distances jusqu'à 20 km en zone tempérée, 10 km en zone équatoriale ;
- orbites radio- diffusées ;
- précision :  $2\text{ mm} + 2 \times 10^{-6} D$  ;

où  $D$  représente la distance entre les points.

\* GPS statique bi-fréquence :

- mesures de phases sur L1 et L2 ;
- durée d'observations : de 1 à 4 heures ;
- distances : jusqu'à 300 km ;
- orbite radio diffusée ;
- précision :  $2\text{ mm} + 10^{-6} D$ .

\* GPS statique ultra précis :

- mesures de phases sur L1 et L2 ;
- durée d'observations : de 1 à plusieurs jours ;
- distances de l'ordre de 5000 km ;

- calcul par traitement semi-dynamique ou avec orbites précises ;
- précision :  $10^{-8}D$  à  $10^{-9}D$ .

#### ***16.6.5. La Statique Rapide***

On choisit une station de référence sur laquelle un récepteur mesure en continu, tandis que des récepteurs mobiles se déplacent sur les autres stations en observant quelques minutes sur chacune d'elles.

Cette technique très productive convient aux petits réseaux pour le cadastre, la topométrie, la densification de réseaux géodésiques et l'équipement photogrammétrique.

#### ***16.6.6. La Réoccupation ou pseudo-cinématique***

La réoccupation est une autre variante du statique. Le principe des calculs est de grouper toutes les observations faites sur un site, lorsque le site est stationné plusieurs fois. Si on observe trois satellites à la première occupation, et trois satellites à la deuxième occupation, le logiciel fera comme si six satellites avaient été observés.

#### ***16.6.7. Le Mode Opérateur***

Le récepteur de référence (base) est stationné sur un point connu, il collecte les données, calcule la correction de 'pseudo-range' en se référant à sa position connue et envoie ces corrections aux utilisateurs (itinérants). Les récepteurs de terrain reçoivent ces corrections et les utilisent pour corriger leurs positions relativement à la position connue de la station de référence.

## 16.7 Les Applications du GPS

Les applications du système GPS sont multiples :

- \* canevas de détails ;
- \* navigation de précision ;
- \* levés hydrographiques de grande précision ;
- \* contrôle d'altitudes (plan d'eau, marée,...) ;
- \* relevés de type sismique ;
- \* surveillance de position et de mouvement (micro-géodésie) ;
- \* levés de détails, cadastre et topographie ;
- \* implantation ;
- \* localisation des points ;
- \* mines, prospection ;
- \* stéréo-préparation.

### 16.7.1. Les Avantages de système GPS

Les avantages de système GPS sont :

- précision centimétrique ;
- indépendance des conditions atmosphériques ;
- nécessite un seul opérateur ;
- productivité active ;
- résultats exploitables en divers domaines :
  - \* photogrammétrie ;
  - \* système d'information géographique (SIG) ;
  - \* génie civil (collection des eaux usées, drainage) ;
- résultats en coordonnées *WGS84* et locales.

## 16.8 Almanach

L'almanach est l'ensemble de paramètres radiodiffusés par chaque satellite GPS, permettant d'estimer la trajectoire et le comportement des horloges du satellite. Il est utilisé pour des prévisions à moyen terme.

Il est intéressant de regarder le nombre de satellites et le  $PDOP$  précédemment défini avant de faire des observations pour éviter les périodes défavorables ( $GDOP > 4$ ,  $PDOP > 3$ ).

La détermination des almanachs nécessite une observation d'environ deux heures pour les récupérer en leur totalité, et un logiciel de traitement. L'almanach peut être valable pour l'observation des autres zones mais dans un délai ne dépassant pas les 60 jours.

Pour obtenir des résultats propres à chaque zone d'études, on doit fixer sa latitude, sa longitude et son altitude ainsi que la date du jour de l'observation.

Les produits sont les graphiques :

- de la visibilité des satellites ;
- des coefficients  $PDOP$  et  $GDOP$  ;
- de la configuration des satellites.



# Chapitre 17

## *Bibliographie*

1. **F.R. Helmert.** 1884. *Die Mathematischen und Physikalischen Theorien der Höheren Geodäsie*; Vol 2, Leipzig, B.G Teubner(reprinted 1962).
2. **H. Poincaré.** 1905. Sur les Lignes géodésiques des surfaces convexes. Transactions of the American Mathematical Society. n°6, pp. 237-274; Œuvres 6, pp. 38-84.
3. **F. Tisserand & H. Andoyer.** 1912. *Leçons de Cosmographie.* 6ème édition. Librairie Armand Colin. 396p.
4. **G. Julia.** 1955. Cours de l'Ecole Polytechnique. *Cours de Géométrie Infinitésimale.* Cinquième Fascicule, Deuxième Partie : Théorie des Surfaces. Deuxième édition entièrement refondue. Editeur Gauthier-Villars. 141p.
5. **W.A. Heiskanen & H. Moritz.** 1967. *Physical Geodesy.* Freeman, San Francisco. Reprint, 1979. Institute of Physical Geodesy, Technical University, Graz, Austria. 364p.
6. **J. Dieudonné.** 1968. *Calcul Infinitésimal.* 1ère édition. Collection Les Méthodes. Hermann, Paris. 479p.
7. **A. Fontaine.** 1969. Rapport sur la Géodésie de la Tunisie. OTC.
8. **C.A.C.G.G. (le Comité Associé Canadien de Géodésie et de Géophysique).** 1973. Canadian Surveyor, Vol 27, n°3.
9. **A. Marussi.** 1974. Africa and Modern Geodesy. Proceedings of the First Symposium in Geodesy in Africa, 14-19 January. Khartoum. Soudan.
10. **B. Morando.** 1974. *Mouvement d'un Satellite Artificiel de la Terre.* Gordon & Breach, Paris, London et New York. 255p.

11. **L. Bers.** 1977. Quasiconformal mappings, with applications to differential equations, function theory and topology. Bulletin of the American Mathematical Society, vol 83, n°6, pp. 1083-1100, 1977.
12. **C. Fezzani.** 1979. Analyse de la structure des réseaux astro-géodésiques tunisiens. Thèse de Docteur Ingénieur. Ecole Nationale des Sciences Géographiques. IGN France. 314p.
13. **C. Boucher.** 1979a. Systèmes géodésiques de référence et autres problèmes géodésiques liés à la localisation en mer. Colloque national sur la localisation en mer. Brest, 1-5 octobre 1979. IGN France.
14. **C. Boucher.** 1979b. Les Transformations géométriques entre systèmes géodésiques. Rapport Technique RT/G n°3, SGNM, IGN France.
15. **P. Dombrowski.** 1979. 150 Years after Gauss "disquisitiones generales circa superficies curvas". Astérisque n°62. Publication de la Société Mathématique de France. 153p.
16. **H.M. Dufour.** 1979. Systèmes de références : Systèmes Projectifs. Conférence présentée au Colloque national sur la Localisation en mer. Brest, 1-5 octobre 1979. 27p.
17. **H. Monge.** 1979. L'ellipsoïde de Clarke 1880. Bulletin d'Information de l'IGN France n°39-1979/3, pp. 37-38.
18. **J. Lemenestrel.** 1980. *Cours de Géodésie Élémentaire*, ENSG, IGN France.
19. **J. Commiot.** 1980. *Cours de Cartographie Mathématique*, ENSG, IGN France.
20. **A. Danjon.** 1980. *Astronomie Générale : Astronomie sphérique et Éléments de mécanique céleste*. Seconde édition, revue et corrigée. Librairie Scientifique et Technique Albert Blanchard. 454p.
21. **B. Doubrovine, S. Novikov et A. Fomenko.** 1982. *Géométrie Contemporaine : Méthodes et Application*. Première Partie : Géométrie des surfaces, des groupes de transformations et des champs. Edition Mir, Moscou. 438p.
22. **M. Charfi.** 1983. Les Travaux de revalorisation de la Géodésie Tunisienne. OTC.
23. **P. Vaniček & E.J. Krakiwsky.** 1986. *Geodesy : the Concepts*. North Holland Compagny. 2ème Edition. 697p.
24. **Defense Mapping Agency(DMA).** 1987a. DMA Technical Report 8350.2. Dept of Defense, World Geodetic System 1984, Its definition and relationships with local geodetic systems. 121p.

25. **Defense Mapping Agency.** 1987b. DMA Technical Report 8350.2-A. Part I : Methods, Techniques, and Data used in WGS84 development. Supplement to Department of Defense World Geodetic System 1984 Technical Report. 412p.
26. **Defense Mapping Agency.** 1987c. DMA Technical Report 8350.2-A. Part II : Parameters, formulas, and graphics for the practical application of WGS84. Supplement to Department of Defense World Geodetic System 1984 Technical Report. 775p.
27. **H. Moritz & I.I. Mueller.** 1988. *Earth Rotation :Theory and Observation.* Ungar Publishing Compagny. New York. 617p.
28. **B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger et J. Collins.** 1992. *Global Positioning System, Theory and Practice.* Springer-Verlag Wien New York. 382p.
29. **M. Burša & K. Pěč.** 1993. *Gravity Field and Dynamics of the Earth.* Springer-Verlag. 385p.
30. **Publications de l'Académie Bavaroise de Géodésie, n°58.** 1997. Symposium de la Commission EUREF, Sofia, 4-7 juin 1997. Extrait du rapport présenté par la Suisse. pp. 212-218.
31. **T. Soler.** 1998. A Compendium of transformation formulas useful in GPS work. *Journal of Geodesy*, Vol.72, n°7/8, pp. 482-490.
32. **E.W. Grafarend.** 1998. Helmut Wolf : Das Wissenschaftliche Werk/ The Scientific Work. Publication de la Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe A, Heft n°115, München 1998. 97p.
33. **P. Petersen.** 1998. *Riemannian Geometry.* Graduate Texts in Mathematics, n°171. Springer-Verlag. 435p.
34. **A. Ben Hadj Salem.** 1999. La Mise à niveau de la Géodésie Tunisienne par l'unification Carthage2000 de ses réseaux, présentée au Premier Atelier Maghrébin de Géodésie. Tunis, 18-20 mai 2000. Publiée dans la revue Géo-Top de l'OTC numéro spécial mai 2000, pp. 6-16.
35. **A. Ben Hadj Salem.** 1999. Note sur les comparaisons des azimuts géodésiques du réseau géodésique primordial Tunisien. 5p.
36. **H. Moritz.** 2000. Geodetic Reference System 1980. *Journal of Geodesy*, vol. 74 n°1, pp. 128-134.
37. **A. Ben Hadj Salem.** 2001. Contrôle de l'azimut d'orientation du système géodésique tunisien Carthage34. Publié dans la revue Géo-Top de l'OTC, n°4 février 2002, pp. 63-68.

38. **H.A. Kastrup.** 2008. On the Advancements of Conformal Transformations and their Associated Symmetries in Geometry and Theoretical Physics. arxiv : physics.hist-ph/0808.2730v1. www.arxiv.org. 82p.
39. **Arrêté du ministre de la Défense nationale du 10 février 2009.** 2009. Journal Officiel de la République Tunisienne n°14 du 17 février 2009.
40. **A.N. Pressley.** 2010. *Elementary Differential Geometry*. Springer-Verlag Heidelberg. 395p.
41. **M. Lemmens.** 2011. *Geo-information : Technologies, Applications and the Environment*. Series Geotechnologies and the Environment. Volume 5. Springer Netherlands. 349p.
42. **E. Zeidler.** 2011. *Quantum Field Theory III : Gauge Theory A Bridge between Mathematicians and Physicists*. Springer-Verlag Heidelberg. 1158p.
43. **A. Ben Hadj Salem.** 2012. Selected Papers. Tome II. pp 165-172.
44. **A. Ben Hadj Salem.** 2013. Histoire de la Topographie en Tunisie : Les Coordonnées Origines Fuseaux. 11p.
45. **United Nations Committee of Experts on Global Geospatial Information Management (UN-GGIM).** 2015. La Résolution adoptée par l'Assemblée générale le 26 février 2015. [www.ggim.un.org/docs/A\\_RES\\_69\\_266\\_F.pdf](http://www.ggim.un.org/docs/A_RES_69_266_F.pdf). 3p.

# Liste des figures

2.1	Le triangle sphérique . . . . .	6
2.2	Le triangle sphérique polaire . . . . .	6
2.3	Calcul de la formule fondamentale . . . . .	8
2.4	La règle de Nepier . . . . .	10
2.5	Un fuseau sphérique . . . . .	11
2.6	Les coordonnées de Cassini-Soldner . . . . .	13
3.1	La sphère céleste . . . . .	19
3.2	La verticale d'un lieu . . . . .	19
3.3	Le plan méridien . . . . .	20
3.4	Vertical d'un astre . . . . .	21
3.5	Les coordonnées locales horizontales . . . . .	22
3.6	Latitude et longitude Géographiques . . . . .	23
3.7	Cercle et angle horaires . . . . .	24
3.8	Les coordonnées équatoriales célestes . . . . .	25
3.9	Heure sidérale locale . . . . .	25
3.10	Relation fondamentale de l'astronomie de position . . . . .	26
3.11	Relation entre $HSL_M$ et $HSG$ . . . . .	27

4.1	Courbe plane .....	34
4.2	Le trièdre de Frenêt .....	37
5.1	Définition de l'ellipse .....	60
5.2	L'affinité .....	60
5.3	La relation entre $\varphi$ et $\psi$ .....	62
5.4	La grande normale .....	64
5.5	L'ellipsoïde de révolution : ellipsoïde de référence .....	66
5.6	Calcul des coordonnées géodésiques .....	67
5.7	La correspondance de la sphère de Jacobi .....	85
6.1	Le repère cartésien .....	90
6.2	Le repère 3D .....	92
6.3	Le potentiel .....	95
7.1	Canevas des points .....	112
7.2	Sessions de densification d'observations GPS .....	114
7.3	Le triangle plan .....	116
8.1	Réduction de la distance suivant la pente .....	120
9.1	Le géoïde .....	126
10.1	Jonction Tuniso-Italienne de 1876 ( <i>C. Fezzani, 1979</i> ) .....	130
10.2	La structure des réseaux géodésiques avant 1978 .....	132
10.3	Le découpage des fuseaux ( <i>C. Fezzani, 1979</i> ) .....	136
10.4	Le repère STT .....	137
10.5	Le repère $(O', X, Y)$ .....	138
10.6	Le Réseau Géodésique Primordial Tunisien .....	143
10.7	les décalages entre le système ancien (LV03) et le nouveau (LV95) .....	145

---

10.8	Le Réseau GPS Tunisien de Référence Spatiale (RGTRS) . . . . .	147
11.1	Représentation plane . . . . .	152
11.2	Tangentes correspondantes . . . . .	153
11.3	Angles correspondants . . . . .	153
11.4	Types de représentation . . . . .	154
11.5	Les directions principales . . . . .	158
11.6	Indicatrice de Tissot . . . . .	159
11.7	Correspondance . . . . .	162
11.8	Image de $y = y_0$ . . . . .	166
11.9	L'image d'un cercle . . . . .	175
12.1	Interprétation géométrique . . . . .	188
12.2	Images des parallèles et des méridiens . . . . .	188
12.3	Le repère origine . . . . .	194
12.4	Le repère $(O', X, Y)$ . . . . .	198
13.1	Interprétation géométrique de l'UTM . . . . .	206
13.2	Passage de $(X, Y)$ à $(\varphi, \lambda)$ . . . . .	209
14.1	Le modèle de Burša-Wolf . . . . .	219
14.2	Modèle de Helmert . . . . .	232
15.1	Le repère céleste . . . . .	245
15.2	Plan de l'orbite . . . . .	246
16.1	Les fréquences du GPS . . . . .	264
16.2	Le repère local . . . . .	269
16.3	Positionnement absolu . . . . .	272
16.4	Positionnement relatif(double différence) . . . . .	272
16.5	Postionnement relatif (Triple différence) . . . . .	273



# Liste des tables

3.1	Table des Unités .....	21
6.1	Caractéristiques des ellipsoïdes géodésiques ( <i>H. Moritz</i> , 2000 ; <i>C. Boucher</i> , 1979a ; <i>DMA</i> , 1987b) .....	102
7.1	Table des observations GPS .....	113
10.1	Caractéristiques de la représentation Lambert Tunisie .....	138



# Index

- Aiguillon F., 178  
Al Battani M.J., 15  
Al Biruni A.R., 16  
Al Mamoun A.J., 15  
Al Mansour A.J., 15  
Al Rachid H., 15  
Al Tusi N., 16  
Al-Farghani A.A., 178  
Andoyer H., 18, 279  
Beltrami E., 173  
Bers L., 173, 280  
Bonne R., 134  
Boucher C., 103, 218, 280  
Brahé T., 16  
Burša M., viii, 96, 218, 281  
Cassini C.F., 12  
Cassini J.D., 16  
Charfi M., 141, 280  
Clairaut A.C., 74  
Clarke A.R., 103  
Collins J., 110, 281  
Commiot J., 172, 280  
Copernic N., 16  
Danjon A., 29, 280  
Darboux J.G., 45  
Dieudonné J., 166, 279  
Dombrowski P., 50, 280  
Doppler C., 101  
Dobrovine B., 49, 280  
Dufour H.M., 184, 185, 280  
Dupin C., 47  
Eratosthenes, 15  
Euler L., 16, 48  
Fezzani C., viii, 130, 131, 136, 140, 184, 280  
Fomenko A., 49, 280  
Fontaine A., 279  
Frenêt J.F., vii, 35  
Galilée G., 16, 95  
Gauss C.F., 49, 50, 57, 96, 178  
Grafarend E.W., 281  
Halley E., 16, 178  
Hamilton W.R., 242  
Harriot T., 178  
Hayford J.F., 101, 103  
Heiskanen W.A., 96, 279  
Helmert F.R., viii, 1, 279  
Hipparque, 15, 178  
Hofmann-Wellenhof B., 110, 281  
Ibn Al Haitam H., 16  
J. Weingarten, 57  
Jacobi C.G.J., 85  
Julia G., 171, 279  
Kastrup H.A., 178, 282  
Kepler J., 16, 240  
Krakiwsky E.J., 280  
Krassovsky N.F., 103  
Laborde J., 199  
Lagrange J.L., 16  
Lambert J.H., 91, 134  
Laplace P.S., 94, 110  
Legendre A.M., 252  
Lemenestrel J., 74, 280  
Lemmens M., 2, 282

- Lichtenegger H.**, 110, 281  
**Listing J.B.**, 96  
**Marussi A.**, 129, 279  
**Mercator G.**, 42  
**Meusnier J.B.**, 46  
**Molodensky M.S.**, viii, 218, 223  
**Monge G.**, 178  
**Monge H.**, 103, 280  
**Morando B.**, 254, 279  
**Moritz H.**, 96, 103, 111, 239, 279, 281  
**Mueller I.I.**, 239, 281  
**Nepier J.**, 10  
**Newton I.**, 16  
**Novikov S.**, 49, 280  
**Pěč K.**, 96, 281  
**Petersen P.**, 71, 281  
**Poincaré H.**, 70, 279  
**Pressley A.N.**, 55, 282  
**Ptolémée C.**, 15, 178  
**Ribaucour A.**, 45  
**Soldner J.G.**, 12  
**Soler T.**, 218, 281  
**Tchebychev P.**, 55  
**Thales D.M.**, 15  
**Tisserand F.**, 18, 279  
**Tissot N.A.**, 158  
**UN-GGIM**, 1  
**Vaniček P.**, 280  
**Wolf H.**, viii, 218, 281  
**Zeidler E.**, 50, 167, 282
- Affinité, 59  
 Affixe, 162  
 Almanach, 277  
 Altération angulaire, 156  
 Altération linéaire, 121, 157, 196  
 Altitude de nivellement, 98  
 Altitude dynamique, 128  
 Altitude ellipsoïdique GPS, 114  
 Altitude GPS, 128  
 Altitude normale ou de Molodensky, 127  
 Altitude orthométrique, 114, 126, 149  
 Ambiguïté entière, 266  
 Angle horaire, 23  
 Angles correspondants, 153  
 Anomalie excentrique, 246  
 Anomalie moyenne, 246  
 Anomalie vraie, 243, 246  
 Anti-Spoofing, 262
- Argument, 161  
 Azimut d'un astre, 21
- Bureau International de l'Heure, 267
- Canevas, 153  
 Cercle horaire de l'astre, 23  
 Champ central, 240  
 Champ de potentiel, 92  
 Codes aléatoires, 263  
 Coefficient de Beltrami, 173  
 Coefficient de distorsion, 175  
 Conditions de Cauchy, 163  
 Constante d'énergie, 242  
 Constante des aires, 241  
 Constante universelle de la gravitation, 239  
 Convergence des méridiens, 198  
 Coordonnées équatoriales célestes, 24  
 Coordonnées curvilignes, 39  
 Coordonnées de Cassini-Soldner, 12, 155  
 Coordonnées géoidales, 99  
 Coordonnées géographiques, 22  
 Coordonnées locales horizontales, 21  
 Coordonnées sphériques, 98  
 Correction de courbure, 118  
 Cote équipotentielle, 125  
 Courbes coordonnées, 39, 154, 189  
 Courbes correspondantes, 152  
 Courbure de Gauss, 49  
 Courbure moyenne, 49  
 Courbure normale, 45  
 Courbure totale, 49  
 Culmination, 26
- Déviation de la verticale, 99  
 Datum géodésique, 90, 92  
 Defense Mapping Agency, 280  
 Deuxième forme fondamentale, 43  
 Deuxième Loi de Kepler, 240  
 Deuxième théorème de Meusnier, 46  
 Directions principales, 48, 158, 189  
 Distance zénithale, 22
- Éléments correspondants, 152  
 Éléments d'orbite, 244  
 Éléments osculateurs, 251  
 ellipsoïde *GRS80*, 111  
 ellipsoïde *WGS84*, 267  
 ellipsoïde d'Airy, 103  
 ellipsoïde de Clarke 1880 Français, 133

- ellipsoïde de Clarke Anglais, 101, 103  
 Ellipsoïde de Clarke Français, 100  
 ellipsoïde de Clarke Français, 103, 144, 148  
 Ellipsoïde de révolution, 66  
 Ellipsoïde international de Hayford, 101  
 Ellipsoïdes géodésiques, 102  
 Ephémérides radiodiffusées, 115  
 Equation de Kepler, 248  
 Equation de Laplace, 110  
 Equations de Gauss-Weingarten, 57  
 Equations paramétriques, 61  
 Excès sphérique, 10
- Facteur de réduction de l'échelle, 197, 211  
 Fonction analytique, 163  
 Fonction harmonique, 165  
 Fonction holomorphe, 173  
 Fonction homographique, 162  
 Force perturbatrice, 250  
 Formule de Cassini, 127  
 Formule de Dufour-Ben Hadj Salem, 185  
 Formule de Dufour-Fezzani, 184  
 Formule de Schols-Laborde, 199  
 Formules de Molodensky, 223  
 Formules de Molodensky abrégées, 226  
 Formules de Molodensky standard, 226  
 Fréquence fondamentale, 263
- Géoïde , 96, 125  
 Géodésie, 1  
 Gal, 95  
 Gradient, 93  
 Grande normale, 64
- Hamiltonien, 242  
 Harmoniques sectoriaux, 254  
 Harmoniques sphériques, 252  
 Harmoniques tesseraux, 254  
 Hauteur d'un astre, 21  
 Hauteur du géoïde , 98  
 Heure sidérale locale, 24
- IGPS Service, 113  
 Indicatrice de Dupin, 47  
 Indicatrice de Tissot, 158, 159, 189  
 Intégrale elliptique, 77, 212  
 Ionosphère, 265  
 Isomètre automécoïque, 191  
 Isomètre stationnaire, 191
- L'Arrêté du 10 février 2009, 148  
 La formule d'Euler, 48  
 La méthode Doppler, 110, 141, 144  
 La représentation UTM, 203  
 Latitude croissante, 42  
 Latitude de Mercator, 42  
 Latitude isométrique, 191  
 Latitude paramétrique, 61  
 Latitude réduite, 61  
 Le GDOP, 267  
 Le HDOP, 267  
 Le laplacien, 94  
 Le PDOP, 267  
 Le problème direct, 78  
 Le problème inverse, 79  
 Le TDOP, 267  
 Le VDOP, 267  
 Lemme de Tissot, 158  
 Ligne géodésique, 70
- Marégraphe, 91, 97, 149  
 Master control station, 261  
 Matrice de rotation, 218, 231  
 Modèle de Burša-Wolf, 218  
 Mode statique absolu, 274  
 Mode statique rapide, 275  
 Module, 161  
 Module aréolaire, 157  
 Module linéaire, 121, 157, 191  
 Modules principaux, 159, 189  
 Moments d'inertie principaux, 253  
 Moments produits d'inertie, 253  
 Monitor station, 254, 261  
 Mouvement diurne, 18
- Navigation Différentielle, 273  
 Nivellement général de la Tunisie, 149
- Observations de phases, 265  
 Observations en pseudo-distances, 264  
 Ondulation du géoïde , 98, 114, 128  
 Orbite osculateur, 251
- Périgée, 243  
 Pôle Conventionnel terrestre, 267  
 Paramétrisation conforme, 56  
 Phase de battement, 265  
 Pivot, 154  
 Plan tangent, 39  
 Point fondamental, 108

- Points correspondants, 152  
 Polynômes de Legendre, 252  
 Positionnement absolu, 271  
 Positionnement relatif, 271  
 Potentiel de la pesanteur, 95  
 Première forme fondamentale, 40, 157  
 Première Loi de Kepler, 242
- Récepteur géodésique, 263  
 Réduction à l'horizontale, 118  
 Réduction à la corde, 199  
 Réduction au niveau zéro, 119  
 Réduction au plan de la représentation plane, 121  
 Référentiel WGS84, 266  
 Réseau Carthage34, 130  
 Réseau géodésique, 2  
 Réseau Géodésique Primordial, 141  
 Rayon de courbure, 35, 37  
 Rayon de courbure de l'ellipse, 66  
 Rayon de courbure de la méridienne, 189  
 Relation de Clairaut, 74  
 Relation fondamentale de l'astronomie de position, 26  
 Représentation équivalente, 186  
 Représentation azimutale, 156  
 Représentation conforme, 160, 170, 187  
 Représentation conique, 156, 187  
 Représentation cylindrique, 155  
 Représentation de Bonne, 134  
 Représentation directe, 154, 187  
 Représentation Fuseaux, 134  
 Représentation Lambert, 136, 187  
 Représentation oblique, 154  
 Représentation quasi-conforme, 172  
 Représentation tangente, 187  
 Représentation transverse, 154  
 Représentation UTM, 139, 149  
 Représentations planes, 151
- Secteur de contrôle, 260  
 Section normale, 46  
 Selective Availability, 262
- Sphère céleste, 18  
 Surface équipotentielle, 96, 125  
 Surface de niveau, 96  
 Surface isotherme, 56  
 Système altimétrique, 91  
 Système BT56, 101  
 Système cartésien, 89  
 Système Carthage86, 142  
 Système de coordonnées, 98  
 Système de référence *ITRF*, 111  
 Système de référence *WGS84*, 110  
 Système Doppler, 259  
 Système Europe 50, 100  
 Système géocentrique *WGS84*, 266  
 Système géodésique, 89  
 Système géodésique NTT, 148  
 Système GPS, 259  
 Système LYB79, 101  
 Système Merchich, 101  
 Système Nord Sahara, 101  
 Système OTC84, 142, 144  
 Système Voirol, 100, 131  
 Systèmes d'altitudes, 125
- Tangentes correspondantes, 153  
 Temps sidéral de Greenwich, 250  
 Tenseur métrique, 40  
 Torsion, 38  
 Transformation de Helmert, 231  
 Transformation de passage, 217  
 Trièdre de Darboux - Ribaucour, 45  
 Trièdre de Frenét, 35  
 Triangle sphérique, 5  
 Triangulation, 91  
 Trilatération, 91  
 Troisième Loi de Kepler, 244  
 Troposphère, 265
- Variable de Mercator, 42  
 Vecteur de gravité, 95  
 Vecteur de Laplace, 243  
 Verticale du lieu, 99  
 Vitesse moyenne angulaire, 246

INDEX