



HAL
open science

Les systèmes géodésiques utilisés en Égypte

Pierre Brial, Nelly Martin, Cécile Shaalan

► **To cite this version:**

Pierre Brial, Nelly Martin, Cécile Shaalan. Les systèmes géodésiques utilisés en Égypte. Marie-Dominique Nenna. Alexandrina 5, 50, Centre d'Études Alexandrines, pp.489-544, 2020, Études Alexandrines, 9782490128136. halshs-03374392

HAL Id: halshs-03374392

<https://shs.hal.science/halshs-03374392>

Submitted on 20 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Alexandrina 5

édité par
Marie-Dominique Nenna



Centre d'Études Alexandrines

Comité de lecture

Frédéric Bauden, professeur à l'université de Liège

Michèle Baussant, directeur de recherche au Cnrs

Jean-Yves Empereur, Institut de France

Paolo Gallo, professeur à l'université de Turin

Marie-Dominique Nenna, directeur de recherche au Cnrs

Mervat Seif el-Din, ministère des Antiquités de l'Égypte

Miguel John Versluys, professeur à l'université de Leyde

© Centre d'Études Alexandrines, USR 3134, Cnrs/Ifao, Alexandrie, 2020

ISBN : 978-2-490128-13-6

ISSN : 1110-6441

Maquette : Fatiha Bouzidi

Mise en page : Fatiha Bouzidi et Mahitab Fathy

Imprimé en Belgique par Peeters

Diffusion et distribution : De Boccard

Pour les ventes en Égypte : Centre d'Études Alexandrines, 50 rue Soliman Yousri, 21131 Alexandrie, Égypte

Pour les autres pays : De Boccard Édition-Diffusion, 4 rue de Lanneau, 75005 Paris, France – www.deboccard.com

Études Alexandrines 50 – 2020

Directeur de la collection: Marie-Dominique Nenna

Alexandrina 5

Édité par
Marie-Dominique Nenna



Centre d'Études Alexandrines

Sommaire

Marie-Dominique Nenna Alexandrie : de la topographie d'une ville à l'archéologie de l'intime. Travaux et publications du Centre d'Études Alexandrines	7
Sculptures, mosaïque et toreutique	19
Paolo Gallo Les faux <i>pharaonica</i> d'Alexandrie : reliquats du grand commerce international d'antiquités (XVIII ^e -XX ^e siècles)	21
Anne-Marie Guimier-Sorbets Un portrait de reine sur l' <i>emblema</i> circulaire de Thmouis	55
Mervat Seif el-Din Statues de prêtres de l'Égypte romaine	67
Samra Azarnouche, Hélène Fragaki, Frantz Grenet De l'Égypte à la Perse : un plat sassanide du VII ^e siècle	97
Fouilles alexandrines	149
Patricia Rifa Abou el-Nil, Gonca Cankardeş-Şenol, Cécile Harlaut, Ahmet Kaan Şenol Chantier de l'ancien consulat britannique (Alexandrie). Fouille du radier de la mosaïque à la rosace et données chronologiques	151
Anne-Marie Guimier-Sorbets Chantier de l'ancien consulat britannique (Alexandrie). Un <i>andrôn</i> alexandrin : architecture, mosaïque et peinture	173

Anne-Marie Guimier-Sorbets

Chantier du Cricket Ground (Alexandrie).

Le geste des mosaïstes : éléments préfabriqués dans un nouveau pavement alexandrin 209

**Patricia Rifa Abou el-Nil, Benoît Clavel, Cécile Harlaut, John W. Hayes,
Nicolas Morand, Marie-Dominique Nenna, Valérie Pichot, Ahmet Kaan Şenol,
Aude Simony**

Chantier du théâtre Diana (Alexandrie). Le puits PT446 de la maison B 221

Elżbieta Rodziewicz

A bone relief of Satyr from the Diana Theater archaeological site, Alexandria 363

Elżbieta Rodziewicz

Bone and ivory workshop remains from the Fouad archaeological site in Alexandria 373

Époque médiévale et ottomane

401

Jean-Claude Bessac, Christophe BenechObservations sur les matériaux et les techniques de construction des tours
de la muraille d'Alexandrie

403

6

Kathrin Machinek

Deux citernes hypostyles dans le fort Qaitbay (Alexandrie) 439

Époque contemporaine

465

Thomas Faucher

Archive épistolaire inédite de Giovanni Dattàri 467

Pierre Brial, Nelly Martin, Cécile Shaalan

Les systèmes géodésiques utilisés en Égypte 489

Abréviations

545

Les systèmes géodésiques utilisés en Égypte

C'est à Alexandrie, en Égypte, qu'eut lieu la première opération géodésique recensée par l'Histoire : la mesure de la circonférence terrestre par Ératosthène, vers 225 av. J.-C.¹. Bien des siècles plus tard, à partir de 1798, l'Égypte fut le premier pays d'Afrique à bénéficier d'une couverture cartographique réalisée par des méthodes modernes : mesure de bases, triangulation appuyée sur des stations astronomiques, relèvement². Entre 1798 et 1801, les savants et ingénieurs de l'expédition de Bonaparte dressèrent ainsi la première carte topographique du pays.

À partir de 1907, et pendant près de 60 ans, l'institution en charge de la production cartographique de l'Égypte, actuellement dénommée Egyptian General Survey Authority (EGSA)³ s'employa à réaliser, par triangulation, le premier réseau géodésique égyptien. En 1977, le service géographique de l'armée des États-Unis, appelé alors Defense Mapping Agency (DMA)⁴, rattacha ce réseau au système géodésique mondial en effectuant des mesures Doppler⁵ entre des balises au sol et des satellites artificiels. En 1995, cette opération de rattachement fut reprise par l'EGSA, avec une précision accrue, en utilisant le *Global Positioning System* (GPS). Des organismes comme, par exemple, l'Institut géographique national (IGN)⁶ français, ou des sociétés

* P. Brial, ingénieur ESGT - géomètre-expert ; N. Martin, ingénieure d'études Cnrs, Migrinter UMR 7301 Cnrs/université de Poitiers ; C. Shaalan, ingénieure d'études Cnrs, CEAlex USR 3134 Cnrs/lfao.

1. AUJAC 2001, p. 51.

2. STONE 1995, p. 64.

3. Institution créée en 1898 sous le nom de Survey Department, elle devient Survey of Egypt à partir de 1919 (Department of Survey and Mines de 1936 à 1939), puis Egyptian Survey Authority (ESA) à partir de 1971. Voir ARNAUD 1989, p. 16-19, 97-98, 101. L'ESA est aussi nommée Egyptian General Survey Authority (EGSA), comme l'atteste les mentions et le logo qui figurent sur les cartes publiées (notamment celles à l'échelle 1/50 000 des années 1980-1990) et sur le site internet <http://www.esa.gov.eg/>.

4. Ce service a été intégré en 1996 dans la National Imagery and Mapping Agency (NIMA), puis en 2003 dans la National Geospatial-Intelligence Agency (NGA).

5. Cette méthode consiste à mesurer la déformation d'une onde émise par un satellite, due à la vitesse du satellite et à sa position par rapport au récepteur situé sur Terre. Connaissant la position du satellite et avec plusieurs mesures, il est ainsi possible de déterminer la position du récepteur. Voir DMA 1983b, p. 53.

6. Depuis le 1^{er} janvier 2012, l'IGN est devenu l'Institut national de l'information géographique et forestière.

privées comme les compagnies pétrolières, sont intervenues sur le territoire égyptien, utilisant à chaque fois leurs propres méthodes, leurs propres mesures, leurs propres systèmes.

Ainsi, l'Égypte bénéficie aujourd'hui d'une très importante richesse cartographique. En contrepartie, en raison de la multiplicité des sources de production, l'utilisateur souhaitant travailler sur ces documents aura souvent les plus grandes difficultés à comparer des cartes d'origine différente et à déterminer dans quel système de coordonnées elles ont été dressées. L'avènement de la topographie par GPS a, par ailleurs, accru le besoin d'obtenir des informations géodésiques précises sur les cartes existantes.

Dans le cadre de leurs travaux au sein du Centre d'Études Alexandrines (CEAlex), les auteurs ont été très fréquemment confrontés à ce type de problème. Ceci les a amenés à recenser les informations disponibles sur les systèmes géodésiques et les projections cartographiques utilisés en Égypte, dont le présent document se veut une synthèse. Elle est destinée à un large public, professionnels de la topographie et de la géodésie, archéologues, ainsi qu'à l'ensemble de la communauté scientifique travaillant en Égypte. Dans un but pédagogique, nous avons fait le choix d'explicitier au préalable, dans une première partie, les notions élémentaires de géodésie employées tout au long de cette étude. Ensuite, sont recensés les onze systèmes géodésiques utilisés en Égypte, puis la production cartographique associée. Enfin, les applications géodésiques mises en place pour les recherches archéologiques au sein du CEAlex sont décrites dans une dernière partie⁷.

Le lecteur doit être averti que contrairement à d'autres disciplines scientifiques, les travaux géodésiques sont souvent le fait d'organismes gouvernementaux (parfois militaires) ou de sociétés privées, et ne donnent pas toujours lieu à publication. Les informations disponibles sont donc rares et ne mentionnent pas toujours clairement les sources des données qu'elles exposent, ce qui rend laborieuse leur vérification. Nous avons essayé d'indiquer le plus précisément possible l'origine des informations fournies par cette contribution, mais nous ne pouvons, malheureusement, garantir leur exactitude. Comme il est de tradition en cartographie et en topographie, nous invitons le lecteur qui souhaiterait utiliser de façon pratique ces données, à procéder au préalable à des essais sur des points connus.

1. Notions de géodésie

La géodésie est la science qui étudie la forme et les dimensions de la Terre. Les coordonnées d'un point A de la surface de la Terre peuvent s'exprimer de différentes façons. Ainsi, on parlera de coordonnées tridimensionnelles cartésiennes géocentriques, mesurées dans un repère orthonormé dont l'origine est le centre des masses de la Terre, ou de coordonnées géographiques, mesurées par rapport à une surface de référence mathématique la plus proche possible de la forme de la Terre. En

7. Nous tenons à remercier Michel Kasser et Françoise Duquenne, pour leur investissement et la direction des travaux d'étudiants de l'École supérieure des géomètres et topographes (ESGT), ainsi que Gilles Canaud et Thierry Gattacceca pour les recherches menées dans la documentation du service de Géodésie et Nivellement de l'IGN. Nous remercions également Damien Laisney, topographe de l'Ifao et aujourd'hui de la Maison de l'Orient et de la Méditerranée, Hassan Kadry, du département des cartes de la Bibliotheca Alexandrina et Alaa Saleh de l'EGSA, pour les échanges d'informations. Enfin, toute notre reconnaissance va à Jean-Yves Empereur et Marie-Dominique Nenna, pour avoir initié ces recherches et encouragé leur publication.

cartographie, les coordonnées seront des coordonnées planes, une fois projetées sur la carte. Dans tous les cas, elles dépendront du référentiel adopté, dont il est indispensable de connaître les paramètres. Nous n'aborderons dans cet article que les systèmes planimétriques.

1.1. Les coordonnées cartésiennes géocentriques

Les coordonnées tridimensionnelles cartésiennes géocentriques (X, Y, Z) sont exprimées en mètres, selon les trois axes d'un repère cartésien ayant son origine au centre des masses de la Terre. Le plan (O, X, Y) est le plan de l'équateur, l'axe (OZ) est l'axe de rotation de la Terre et le plan (O, X, Z) est le plan méridien origine (fig. 1). Selon le système géodésique utilisé, le point d'origine O sera placé différemment. Ces coordonnées peuvent être utilisées lors de mesures GPS, ou par exemple lors des calculs de changement de système géodésique.

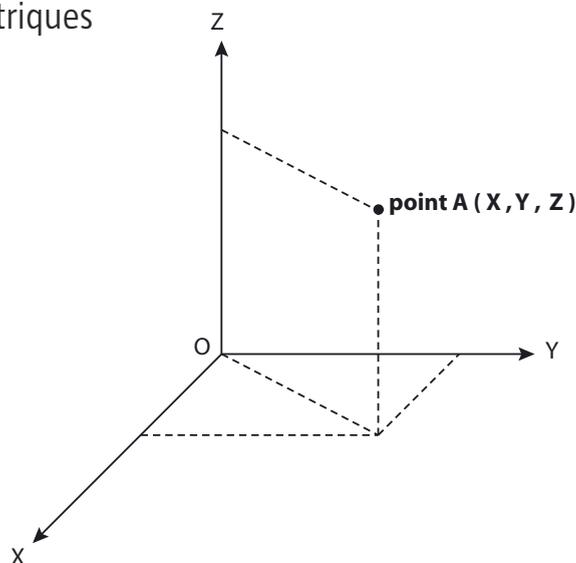


Figure 1 : Représentation des coordonnées cartésiennes géocentriques. Dessin N. Martin

1.2. La longitude et la latitude

Une carte topographique peut être couverte d'un ou plusieurs quadrillages (ou amorces de quadrillages), appelés aussi carroyages ou grilles. L'une de ces grilles, graduée en degrés ou en grades⁸, représente les coordonnées angulaires dites géographiques : la longitude λ et la latitude φ (fig. 2).

Afin de pouvoir convertir en longitude et en latitude des mesures de distance et d'angle réalisées à la surface de la Terre, il faut assimiler cette dernière à une forme géométrique régulière. Ainsi la Terre, que l'on pourrait croire assimilable à une sphère est, comme on le sait, « aplatie » aux pôles. La surface mathématique qui s'en rapproche le plus est l'ellipsoïde de révolution (ou sphéroïde)¹⁰, défini par son

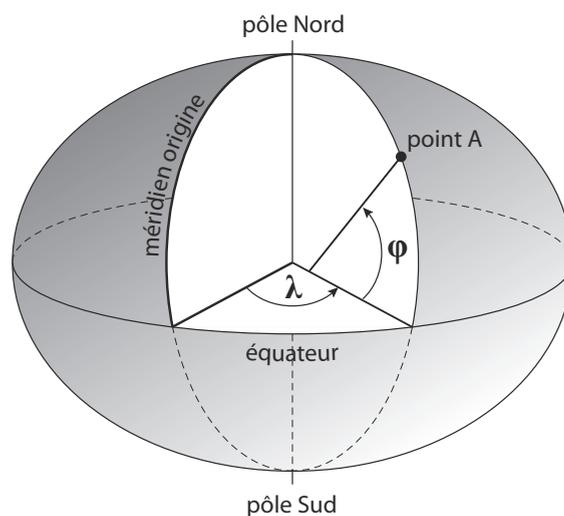


Figure 2 : Représentation de la longitude λ et de la latitude φ . Dessin N. Martin

8. 90 degrés = 100 grades.

9. Il existe une troisième composante dans les coordonnées géographiques, la hauteur au-dessus de l'ellipsoïde h , notion qui ne sera pas abordée dans cet article.

10. Nous utiliserons dans l'article le terme « ellipsoïde ».

demi-grand axe a et son demi-petit axe b , desquels on déduit l'aplatissement¹¹ $f = (a - b) / a$ (fig. 3). Il est techniquement difficile de déterminer l'aplatissement et le rayon de la Terre à l'équateur, qui correspond au demi-grand axe de l'ellipsoïde. Depuis deux siècles, plusieurs modèles se sont succédé avec des valeurs différentes, déterminés en fonction de leur application cartographique, locale (à l'échelle d'une région du globe) ou mondiale (à l'échelle du globe).

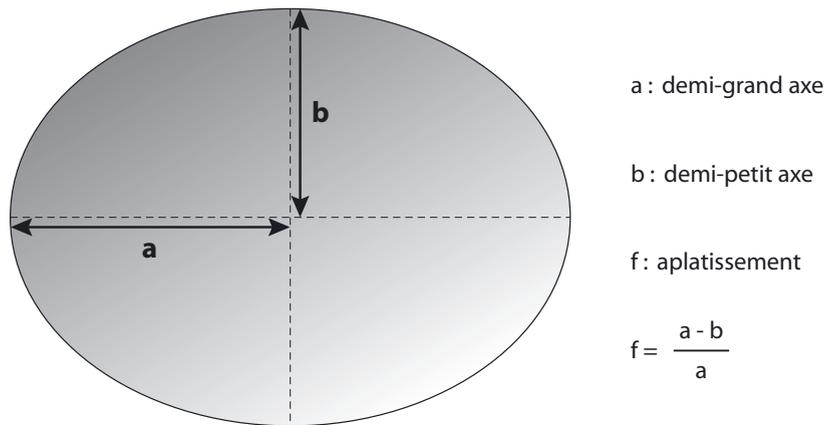


Figure 3 : Représentation des paramètres définissant un ellipsoïde. Dessin N. Martin

1.3. Les projections cartographiques

Sur une carte topographique, un deuxième carroyage est en général présent, gradué cette fois-ci en mètres ou en kilomètres. Il s'agit de la grille de la projection, c'est-à-dire de la tentative de représenter un volume sphéroïde, la Terre, sur une surface plane, la carte (fig. 4). Il existe plusieurs types de projection. Toutes se basent sur des formules mathématiques qui convertissent les coordonnées géographiques du système angulaire (en degrés ou en grades) en coordonnées planes dans le système métrique. Il est en effet plus facile de faire des mesures de distance à partir de coordonnées planes métriques que sur des coordonnées exprimées en degrés. Les projections

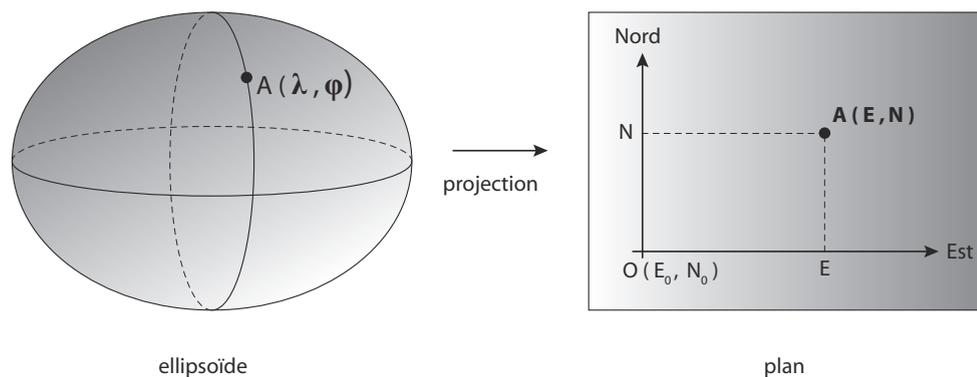


Figure 4 : Représentation de la projection cartographique et des coordonnées planes. Dessin N. Martin

11. L'aplatissement est couramment noté f de l'anglais *flattening* ; en tant que rapport, il n'a pas d'unité.

peuvent être cylindriques, coniques ou azimutales (respectivement projection de l'ellipsoïde sur un cylindre, un cône ou un plan).

En Égypte, ce sont le plus souvent des projections cylindriques de type Mercator Transverse (projection sur un cylindre tangent à un méridien origine) qui sont utilisées (fig. 5), comme l'*Egyptian Transverse Mercator* (ETM) et le *Modified Transverse Mercator* (MTM), ainsi que l'*Universal Transverse Mercator* (UTM), cette dernière étant appliquée à l'ensemble du globe. Les cartes marines sont la plupart du temps en projection Mercator (ou Mercator directe), qui est une projection sur un cylindre tangent à l'équateur (fig. 6).

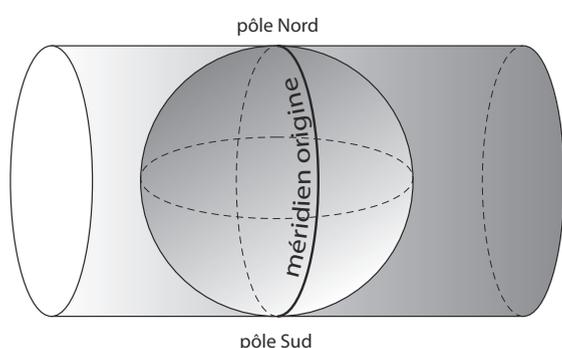


Figure 5 : Projection Mercator Transverse. Dessin N. Martin

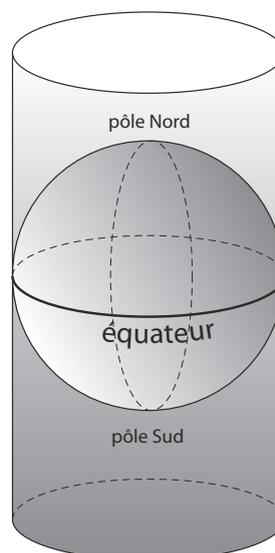


Figure 6 : Projection Mercator. Dessin N. Martin

1.4. Les systèmes géodésiques

On pourrait croire que les notions de longitude et de latitude, bien connues des utilisateurs de cartes, sont définies de façon universelle et que, comme dans tout bon roman de chasse au trésor, connaître la longitude et la latitude d'un point permettra de le retrouver, à quelques centimètres près. Malheureusement, dans la vie réelle, il n'en est rien.

Jusque dans les années 1970, les coordonnées géographiques (longitude et latitude) étaient déterminées par des mesures astronomiques¹². En général, pour un pays entier, on déterminait astronomiquement un seul point, appelé point fondamental. Le reste de la carte était relevé par des mesures terrestres rattachées à ce point, mais ces mesures astronomiques pouvaient être peu précises. À ce problème, vient s'ajouter celui du modèle mathématique choisi pour représenter la forme de la Terre, puisque, suivant les pays et les époques, différentes dimensions ont pu être utilisées pour les paramètres d'ellipsoïde.

On comprendra donc que deux systèmes de coordonnées partant de deux points fondamentaux différents et s'appuyant sur des ellipsoïdes différents, peuvent présenter des écarts

12. Les mesures astronomiques consistent à combiner des relevés de hauteur d'étoiles et des mesures de temps, qui permettent de calculer la longitude et la latitude.

dépassant le kilomètre. À titre d'exemple, le sommet de la pyramide de Khéops dans le système géodésique Égypte 1907 est situé à 7 km du point ayant les mêmes coordonnées géographiques dans le système déterminé par la commission d'Égypte en 1803.

À partir des années 1950, le ministère de la Défense des États-Unis a mis en place un système de référence mondial basé, non plus sur des mesures astronomiques et terrestres (géodésie terrestre), mais sur des mesures par satellites (géodésie spatiale). Dès lors, de nouveaux systèmes géodésiques mondiaux ont été créés, comme le *World Geodetic System* (WGS), déterminé à partir de 1966 et dont les réalisations les plus connues sont WGS 72 et WGS 84 (système actuellement utilisé par le GPS) ou encore l'*International Terrestrial Reference System* (ITRS). L'ITRS est un système géodésique mis en place à partir de 1984 par l'International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), dans la continuité du WGS 84. Il prend en compte le mouvement des plaques tectoniques et les variations d'orientation de la terre dans l'espace. De ce fait, le système est redéfini à intervalles réguliers appelés « réalisations », sous le nom d'*International Terrestrial Reference Frame* (ITRF)¹³. À terme, l'objectif est d'uniformiser les systèmes de coordonnées.

Afin de localiser mathématiquement un point sur la Terre de façon univoque, il faut définir un système géodésique, appelé aussi système de référence de coordonnées¹⁴, référentiel, ou encore *datum* en anglais. Selon le contexte, la notion de « système géodésique » peut désigner le système de référence permettant l'expression des trois types de coordonnées définies plus haut : coordonnées cartésiennes géocentriques (X, Y, Z), coordonnées géographiques (longitude λ , latitude φ) ou encore les coordonnées planes (E, N).

494

Un système géodésique ou système de référence permettant l'expression des coordonnées cartésiennes géocentriques (X, Y, Z) se définit par un repère cartésien tridimensionnel ayant son origine au centre des masses de la Terre (voir fig. 1).

Un système de référence de coordonnées géographiques¹⁵ (latitude λ , longitude φ) se définit par :

- un ellipsoïde de référence géocentré (ellipsoïde mondial) ou tangent au géoïde à son point fondamental ;
- un méridien origine, définissant la référence de la longitude.

Un système de référence de coordonnées projetées¹⁶ se définit par :

- un système référence de coordonnées géographiques ;
- une projection.

Indiquer les coordonnées d'un point n'est donc pas suffisant. Il convient aussi de préciser dans quel système géodésique ou système de référence de coordonnées (géographiques et/ou projetées) elles ont été établies.

13. MCCARTHY, PETIT 2004.

14. Appellation EPSG (voir § 1.6) : *Coordinate Reference System (CRS)*.

15. Appellation EPSG : *Geographic CRS*.

16. Appellation EPSG : *Projected CRS*.

1.5. Transformations entre systèmes géodésiques

La connaissance du système géodésique utilisé pour réaliser une carte est devenue cruciale avec le développement de l'usage du GPS en topographie. En effet, le GPS délivre des coordonnées dans le système mondial WGS 84. Bien que la tendance actuelle des agences gouvernementales de cartographie consiste à remplacer les systèmes locaux (nationaux ou régionaux) par des systèmes basés eux-mêmes sur des systèmes mondiaux WGS 84 ou ITRS¹⁷, la grande majorité des cartes en circulation à ce jour ont été dessinées dans les anciens systèmes. Heureusement, les GPS et certains logiciels de topographie ou de systèmes d'information géographique (SIG) disposent de fonctions permettant de convertir les coordonnées WGS 84 en coordonnées locales (et vice-versa), à condition d'y introduire les paramètres de transformation appropriés. C'est pourquoi, nous avons chaque fois que possible, indiqué au lecteur les valeurs de ces paramètres pour chaque système étudié.

Un changement de système géodésique s'effectue en général par une transformation dite d'Helmert (fig. 7), appelée aussi similitude spatiale à sept paramètres. Elle consiste à appliquer au système de départ une translation T (d_x , d_y , d_z) et une rotation dans les trois dimensions (r_x , r_y , r_z), en affectant un facteur d'échelle D qui agrandit ou diminue les distances, par homothétie. Les rotations s'effectuent par défaut autour de l'origine du système, au centre de l'ellipsoïde de référence. Une variante permet d'imposer un autre point de rotation dont les coordonnées doivent être spécifiées : il s'agit dans ce cas d'une transformation dite de Molodensky-Badekas. D'autres méthodes de transformation existent, utilisant par exemple des équations polynomiales.

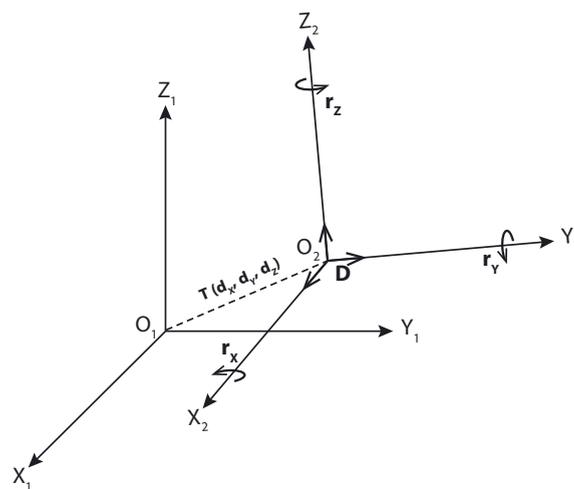


Figure 7 : Changement de système géodésique par transformation d'Helmert, d'après DUQUENNE *et al.* 2005, p. 88. Dessin N. Martin

1.6. La base de données de l'EPSG

L'European Petroleum Survey Group (EPSG), créé dans les années 1980, a élaboré un recensement mondial des systèmes de référence de coordonnées et des projections, pour les besoins de la recherche pétrolière. Après avoir été mise en ligne, cette base de données appelée *EPSG Geodetic Parameter Registry* est devenue, au fil des ans, une référence pour les utilisateurs de cartes et de SIG. Elle est aujourd'hui consultable en ligne sur le site internet hébergé par l'International Association of Oil & Gas Producers (IOGP)¹⁸ et téléchargeable dans différents formats¹⁹. Le code interne de la base de données (code EPSG) apparaît maintenant souvent en clair dans les

17. La différence entre les systèmes WGS 84 et ITRS est suffisamment faible pour être négligée en topographie. À ce sujet, voir http://igs.bkg.bund.de/root_ftp/MISC/ITRF/WGS84.txt.

18. À l'adresse : <https://www.epsg-registry.org>.

19. Nous avons notamment téléchargé la base au format Microsoft Access EPSG_v9_0.mdb dans sa version 9.0 du 15 décembre 2016, citée ci-après sous la référence EPSG 2016.

logiciels de SIG et les géoportails en ligne ; il est également utilisé dans les standards de l'Open Geospatial Consortium (OGC). Il existe un code EPSG pour chaque définition : ellipsoïde, système de référence de coordonnées géographiques ou projetées, transformation, etc. Dans la mesure du possible, nous mentionnerons les codes EPSG des systèmes cités, lorsqu'ils existent, y compris dans les tableaux de synthèse à la fin de cette étude.

1.7. La nomenclature utilisée

Les termes, sigles et abréviations utilisés dans cet article sont explicités ci-dessous.

Ellipsoïde (voir fig. 3) :

a , demi-grand axe, rayon de l'ellipsoïde à l'équateur (en mètres) ;

f , aplatissement ;

da , différence de demi-grand axe entre les ellipsoïdes WGS 84 et local (en mètres),

$$da = a_{\text{WGS84}} - a_{\text{local}} ;$$

df , différence d'aplatissement entre les ellipsoïdes WGS 84 et local, $df = f_{\text{WGS84}} - f_{\text{local}}$.

Les différences de demi-grand axe da et d'aplatissement df pour un ellipsoïde sont surtout utiles pour paramétrer les GPS de navigation. Pour les GPS de marque Garmin, c'est la valeur $df \times 10\ 000$ (soit $df \times 10^4$) qui doit être saisie.

496

Projection (voir fig. 4) :

λ_o, φ_o , longitude et latitude du point origine de la projection (en degrés) ;

E_o, N_o , coordonnées planes Est (abscisse) et Nord (ordonnée) du point origine de la projection (en mètres)²⁰.

Changement de système géodésique par transformation d'Helmert ou de Molodensky-Badekas (voir fig. 7) :

d_x, d_y, d_z , paramètres de la translation (en mètres) ;

r_x, r_y, r_z , paramètres de la rotation (en secondes) ;

X_p, Y_p, Z_p , coordonnées du point de rotation, pour la transformation de Molodensky-Badekas (en mètres) ;

D , facteur d'échelle (en ppm²¹).

Sauf mention contraire, les paramètres sont indiqués pour une transformation d'Helmert, dans le sens système local vers le système WGS 84. Le signe des rotations respecte les conventions de l'IERS²² ; il est ainsi conforme aux publications de l'Association internationale de géodésie (AIG) et à la convention dite de « rotation par vecteur de position » de l'EPSG²³. L'utilisateur devra veiller à inverser les signes si son appareil requiert des paramètres dans le sens

20. Ces coordonnées arbitraires sont attribuées au point origine pour éviter les coordonnées négatives.

21. Partie par million.

22. IERS 1992, p. 18.

23. EPSG, *Data set coordinate operation*, code 1033 ; IOGP 2016, p. 131, 132, 134, 135.

inverse. Sur les équipements et logiciels de la marque Leica Geosystems, les paramètres sont donnés dans le sens système WGS 84 vers système local; ainsi, les signes des rotations ne suivent pas la convention IERS. Le **tableau 1** présente la transformation CEALex 1999 permettant une conversion du système Égypte 1907 vers WGS 84. On notera que les signes de tous les paramètres sont inversés, à l'exception de celui de la rotation (r_z) qui ne change pas.

Paramètres de transformation à saisir	d_x (m)	d_y (m)	d_z (m)	r_z (")	D (ppm)
Convention IERS : local → WGS 84	- 223,505	196,43	- 31,601	- 4,532762	7,7195
Leica Geosystems : WGS 84 → local	223,505	- 196,43	31,601	- 4,532762	- 7,7195

Tableau 1 : Exemple de paramètres de transformation d'Helmert, suivant les conventions d'utilisation ou les applications

2. Les systèmes géodésiques utilisés en Égypte

À l'exception du système Commission d'Égypte 1803, tous les systèmes géodésiques étudiés utilisent comme origine le méridien international de Greenwich. Ils sont présentés dans cette partie par ordre chronologique de leur détermination, du plus ancien au plus récent.

2.1. Commission d'Égypte 1803

L'expédition française, qui occupa l'Égypte de 1798 à 1801, comprenait une Commission des sciences et des arts chargée d'effectuer une étude détaillée du pays. L'importance et la qualité des moyens mis en œuvre dans cette entreprise n'ont pas d'équivalent dans l'histoire des expéditions coloniales. Dans le domaine cartographique, la Commission comprenait 4 mathématiciens, 4 astronomes, 15 ingénieurs géographes, 27 ingénieurs des Ponts et Chaussées et 6 ingénieurs du génie maritime²⁴. Par ailleurs, les officiers de l'armée et de la marine étaient formés pour lever des cartes.

L'un des objectifs de la Commission était de dresser une carte détaillée de l'Égypte. Il avait été originellement prévu de mesurer par triangulation un arc de méridien entre le 24° et le 31° degré de latitude, qui aurait servi d'ossature à l'établissement de la carte²⁵. Mais les contraintes militaires et l'impossibilité de sécuriser suffisamment l'ensemble du pays empêchèrent la réalisation de ce projet. À la place, des points astronomiques indépendants furent mesurés depuis Alexandrie jusqu'à Philae. Des triangulations locales furent établies au Caire et à Alexandrie. Le levé de détail fut réalisé à la planchette ou par des reconnaissances militaires à la boussole, s'appuyant, chaque fois que possible, sur les points astronomiques et sur les triangulations²⁶. C'est en 1803, à Paris, que la Commission d'Égypte effectua le choix de l'échelle et de la projection²⁷ (**fig. 8**).

24. LAISSUS 1998, p. 523-525.

25. JACOTIN 1824, p. 439.

26. GODLEWSKA 1988, p. 38-39.

27. JACOTIN 1824, p. 491-493.

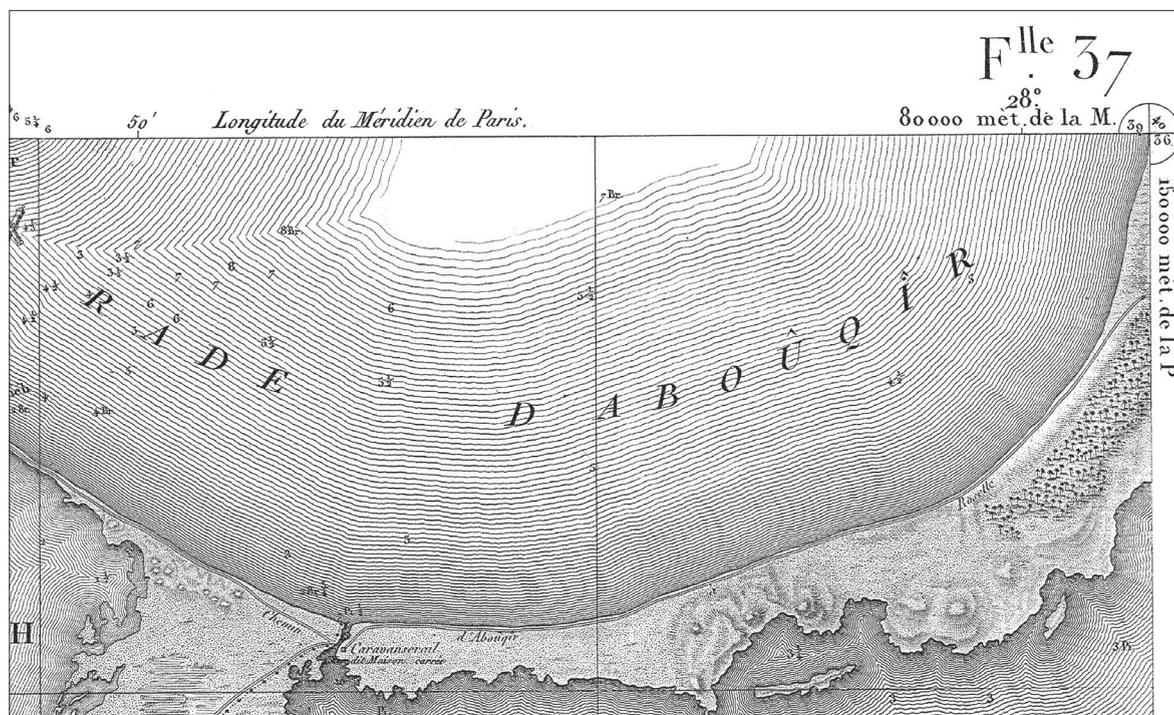


Figure 8 : Extrait de la feuille 37 « Alexandrie » de la Carte Topographique de l'Égypte au 1/100 000, publiée dans la *Description de l'Égypte* en 1818. La référence au « Méridien de Paris » est indiquée. À chaque coin des 47 feuilles sont reportées les distances en mètres à la Méridienne (M.) de la Grande Pyramide pour les abscisses, et les distances à sa Perpendiculaire (P.) pour les ordonnées. © Archives CEALex

Bien que le fait de parler d'un système géodésique alors que les points astronomiques de base ne sont pas reliés entre eux puisse être contesté, nous avons considéré que le point fondamental était situé sur la terrasse de la maison de l'Institut d'Égypte au Caire (**fig. 9**), où les mesures effectuées servirent de référence à l'astronome Nicolas-Antoine Nouet²⁸.

Les calculs effectués pour la construction de la carte ont utilisé le mètre provisoire en usage en Égypte pendant l'expédition et valant 3080/3079 mètres actuels²⁹.

Paramètres du système

Les caractéristiques du système géodésique, ayant servi à l'établissement de la carte topographique de l'Égypte à l'échelle 1/100 000, sont les suivantes :

Ellipsoïde : Commission des poids et mesures 1799 ($a = 6\,375\,738,7\text{ m}$; $f = 1/334,29$)³⁰

Méridien origine : Paris ($\lambda_{\text{réf. Greenwich}} = \lambda_{\text{réf. Paris}} + 2^{\circ} 20' 14,025''$)

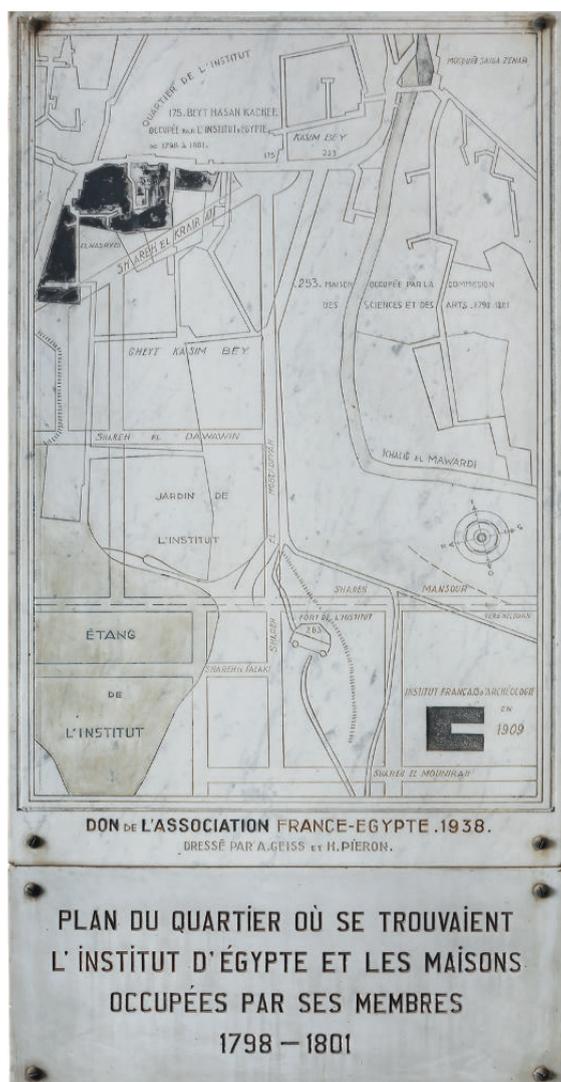
Point fondamental : Terrasse de la maison de l'Institut d'Égypte au Caire

$$\lambda = 28^{\circ} 58' 30'' \text{ E}_{\text{Paris}} \quad \varphi = 30^{\circ} 02' 21'' \text{ N}$$

28. NOUET 1822, p. 1-35.

29. JACOTIN 1824, p. 492, note 4.

30. MEYER 2002, p. 182 ; voir également http://www.sonel.org/THES/chap5_4.html. Aussi appelé ellipsoïde de Plessis (MUGNIER 2008, p. 1307). Jacotin donne la valeur 1/334 pour l'aplatissement (JACOTIN 1824, p. 492).



Projection associée

Projection cylindrique transverse de Cassini³¹

Point origine : Grande Pyramide de Giza

$$\lambda_0 = 28^{\circ} 52' 02'' E_{\text{Paris}}$$

$$\varphi_0 = 29^{\circ} 59' 06'' N$$

$$E_0 = 0 \text{ m} \quad N_0 = 0 \text{ m}$$

Figure 9 : Plaque se trouvant sur la façade du palais Mounira au Caire, actuel Institut français d'archéologie orientale (Ifao), localisant l'Institut d'Égypte, 1798-1801.

© Cliché G. Pollin

31. GODLEWSKA 1988, p. 45. La projection de Cassini est la version transverse de la projection équirectangulaire, où l'équateur est remplacé par le méridien central. Une projection équirectangulaire représente les méridiens et parallèles par une grille carrée.

2.2. Égypte 1907

Appellations référencées : Egypt 1907³², Egypt Geodetic Datum (EGD)³³, Egyptian Datum 1930³⁴, Egyptian Transverse Mercator (ETM)³⁵, National Geodetic Net. Az Zahrâ' 1874³⁶, National Geodetic Net. Venus 1874³⁷, Old Egyptian³⁸, Old Egyptian 1907³⁹, Old Egyptian 1930⁴⁰, Old Egyptian Datum 1930⁴¹, Survey of Egypt geodetic system (SE51)⁴².

Historique du système

La longue histoire de ce système géodésique explique l'abondance des appellations et la confusion qui en découle. La carte de l'Égypte de l'expédition française est restée en vigueur pendant tout le XIX^e siècle. À la fin de ce dernier, le développement rapide du pays imposait l'établissement d'une nouvelle carte, basée sur une triangulation complète. Le premier pas fut réalisé par l'expédition scientifique britannique chargée d'observer le transit de Vénus, en 1874⁴³. Un point fondamental astronomique fut établi sur la station appelée FI, située sur les collines du Moqattam près du Caire, et observée par le capitaine Orde Browne. La délicate mesure du temps, nécessaire à la détermination précise de la longitude, fut obtenue par une communication télégraphique avec l'observatoire de Greenwich⁴⁴. C'est cette première opération qui a donné le nom de Venus 1874 (**fig. 10**), ou encore Az Zahrâ'⁴⁵ 1874 (**fig. 11**), parfois porté par ce système géodésique.

Ces travaux n'eurent pas de suite immédiate, car il fallait au préalable organiser une administration chargée du projet d'établissement de la carte. C'est en effet en 1898 que fut créé le Survey Department, sous la direction du capitaine H.G. Lyons, par regroupement des diverses entités s'occupant de topographie, de géologie et d'hydrographie⁴⁶.

La triangulation commença en 1907 et le premier réseau, composé de dix sections couvrant la vallée du Nil et la côte méditerranéenne, fut terminé en 1945⁴⁷. Les calculs d'ajustement furent réalisés par section et se terminèrent en 1951, d'où le nom de *Survey of Egypt geodetic system* (SE51) également donné à ce système géodésique⁴⁸. Un deuxième réseau couvrant le désert Libyque et

32. EPSG 2016, *Geographic CRS*, code 4229.

33. SAAD *et al.* 1998.

34. EGYPTIAN SURVEYS LIMITED s. d., p. 3.

35. Spatiocarte « Greater Cairo, Satellite Tourist Map » (EGSA/IGN France International, 2002, 1/70 000), voir fig. 12 ; Orthophotoplan NH35-P3b-6a d'Alexandrie (EGSA, 1995, 1/10 000), voir fig. 13. Par abus de langage, la projection est assimilée au système géodésique.

36. Carte NG36-D2b « Wādī Lahamî » (EGSA, 1989, 1/50 000), voir fig. 11.

37. Carte NH35-L6c « Burj al-'Arab » (EGSA, 1996, 1/50 000), voir fig. 10 ; orthophotoplan NH35-P3b-6a d'Alexandrie (EGSA, 1995, 1/10 000), voir fig. 13.

38. EPSG 2016, *Geographic CRS*, code 4229.

39. NIMA 2000, append. B:1-3.

40. IGN 1982, fiche « Old Egyptian 1930 ».

41. EGYPTIAN SURVEYS LIMITED s. d., p. 3.

42. EL HOSSSENY 1990, p. 222.

43. Les 8 et 9 décembre 1874.

44. WADE 1924, p. 7 ; LYONS 1908, p. 268 ; BROWNE 1881 ; RATCLIFF 2015, p. 111-112.

45. *Az Zahrâ'* (الزهراء) est la traduction arabe de Vénus.

46. LYONS 1908, p. 7 ; MURRAY 1950, p. 1.

47. COLE 1944, p. 1 ; EL HOSSSENY 1982, p. 20.

48. EL HOSSSENY 1990, p. 222.

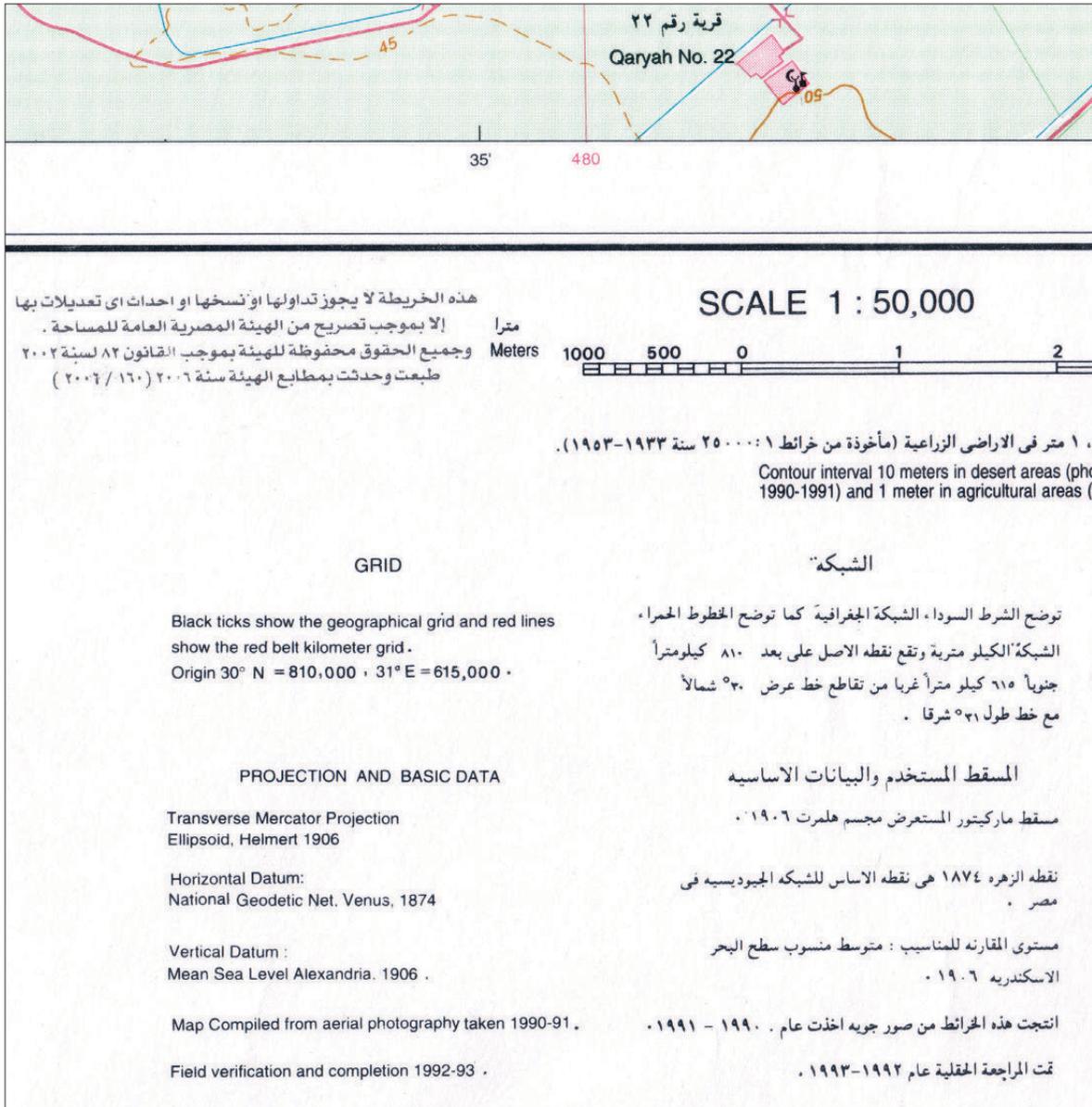


Figure 10 : Extrait de la carte NH35-L6c « Burj al-'Arab » (EGSA, 1996, 1/50 000), au sud-ouest d'Alexandrie, utilisant le système Égypte 2007 et la projection « Red Belt ». On remarquera que, pour cette série de cartes 1/50 000, le carroyage kilométrique est imprimé de la couleur du nom de la projection – ici rouge – comme indiqué en anglais dans la légende. © Archives CEALex



Figure 11 : Extrait de la carte NG36-D2b « Wādī Lahamî » (EGSA, 1989, 1/50 000) au bord de la mer Rouge, utilisant le système Égypte 1907 et la projection « Green Belt ». © Archives CEALex

la côte de la mer Rouge fut réalisé entre 1955 et 1968⁴⁹. Dès 1907, le modèle d'ellipsoïde retenu pour le calcul de la triangulation fut celui d'Helmert 1906⁵⁰.

La projection Mercator Transverse, appelée alors « conforme de Gauss », fut utilisée pour le dessin des cartes à une échelle supérieure ou égale au 1/250 000⁵¹. Cette projection comportait à l'origine une seule zone centrée sur le méridien de longitude 31° Est, au plus proche des terres

49. *Id.* 1982, p. 16, 20, 29-31.

50. COLE 1944, p. 75.

51. *Ibid.*, p. 117.

cultivées de Basse-Égypte⁵² et de telle sorte qu'aucune terre cultivée ne soit distante de plus de 2° de ce méridien central⁵³. Cette projection ne donna pas lieu, immédiatement, à la représentation d'une grille métrique sur les cartes; seul le carroyage en longitude et latitude était alors représenté⁵⁴. Les cartes géographiques au 1/500 000⁵⁵ furent, quant à elles, dessinées par une projection polyconique⁵⁶ s'appuyant sur les méridiens 27° et 35° de longitude Est⁵⁷.

C'est à partir de 1924⁵⁸ que fut mise progressivement en place la grille métrique sur les cartes topographiques. Ce quadrillage, couramment appelé système kilométrique ou « kilo », s'appuyait sur la projection Mercator Transverse existante. La première zone, appelée aujourd'hui *Red Belt* et centrée sur le méridien 31° de longitude Est, semble avoir été appliquée au-delà de l'emprise actuelle dans les années 1950, sur des cartes dressées par le service cartographique de l'armée américaine, couvrant la mer Rouge et le Sinaï⁵⁹. Cependant, pour minimiser les déformations dues à la projection, deux autres zones dont on trouve mention dès 1944⁶⁰, ont été définies de part et d'autre de la *Red Belt*. À l'ouest, la zone couvrant le désert Libyque, appelée aujourd'hui *Purple Belt*, est centrée sur le méridien 27° de longitude Est. À l'est, une troisième zone a été définie pour couvrir le Sinaï. Mentionnée en 1944 comme étant centrée sur le méridien 34° de longitude Est⁶¹, il est maintenant admis qu'elle est centrée sur le méridien 35° de longitude Est⁶². Cette dernière zone est appelée aujourd'hui *Blue Belt*⁶³ ou *Green Belt*; toutefois nous n'avons pas connaissance de cartes portant la mention *Blue Belt*, seule la mention *Green Belt*⁶⁴ a été publiée sur les cartes au 1/50 000 du bord de la mer Rouge (voir fig. 11). Ces trois projections sont maintenant habituellement désignées sous le nom d'*Egyptian Transverse Mercator* (ETM) (fig. 12-13) sur les cartes publiées par l'EGSA ou dans la littérature récente⁶⁵. C'est à la mise en place de ces grilles sur les cartes qu'est apparu le nom d'Old Egyptian 1930 (fig. 14), alors qu'il s'agissait toujours du même système géodésique, Égypte 1907.

52. LYONS 1908, p. 273-278.

53. SURVEY OF EGYPT 1924.

54. Par exemple, les cartes au 1/50 000 publiées dans *l'Atlas of Egypt* par le Survey Department en 1914, SURVEY DEPARTMENT 1914.

55. EGSA 2014, p. 8.

56. La projection polyconique est une évolution de la projection conique, pour laquelle on utiliserait une infinité de cônes tangents à chaque parallèle. L'échelle reste ainsi vraie le long des parallèles et du méridien central.

57. COLE 1944, p. 118.

58. SURVEY OF EGYPT 1924. La plus ancienne carte vue par les auteurs et sur laquelle figure cette grille est la carte n° 92/48 au 1/100 000 d'Alexandrie, datée de 1925.

59. Par exemple, les cartes de l'Army Map Service (AMS) à l'échelle 1/250 000 des années 1950, n° NF 36-7, NF 36-8, NH 36-14 et NH 36-15, disponibles à l'adresse : http://www.lib.utexas.edu/maps/ams/north_africa/.

60. COLE 1944, p. 116-117.

61. *Ibid.*, p. 116-117.

62. EPSG 2016, *Projected CRS*, code 22991.

63. L'EPSG a retenu *Blue Belt*, avec en seconde appellation *Green Belt*. La mention *Blue Belt* figure également sur un document intitulé « The three belt system of Egypt » (ANONYME s.d.), ainsi que sur plusieurs sites internet privés, comme <https://www.youtube.com/watch?v=27dW5HK4JIY> et <http://digitalmapofegypt.blogspot.fr/2008/04/old-egyptian-1907-datum.html>.

64. EGSA 2004, p. 113.

65. AWWAD 2016, p. 57.



Figure 12 : Extrait de la spatiocarte « Greater Cairo, Satellite Tourist Map », EGSA/IGN France International (IGN-FI), 2002, 1/70 000. © Archives CEALex



Figure 13 : Extrait de l'orthophotoplan NH35-P3b-6a d'Alexandrie, EGSA, 1995, 1/10 000. © Archives CEALex

Par ailleurs, les projections *Red Belt* et *Purple Belt* ont été étendues vers le sud, sous les appellations *Extended Red Belt* et *Extended Purple Belt*⁶⁶ (ou *Red Belt Sud* et *Purple Belt Sud*⁶⁷, fig. 15 et 16), avec l'ajout d'une constante de 1 000 000 mètres aux coordonnées planes Nord (N_o), afin d'éviter des coordonnées négatives⁶⁸ (voir tableau 3).

66. EPSG 2016, *Projected CRS*, code 22994.

67. IGN 1995, fiches « Red Belt Sud » (voir fig. 16) et « Purple Belt Sud ».

68. Pour la projection *Egypt Red Belt*, « South of the false origin add 1 000 000 m to the northings » (AMS 1950).

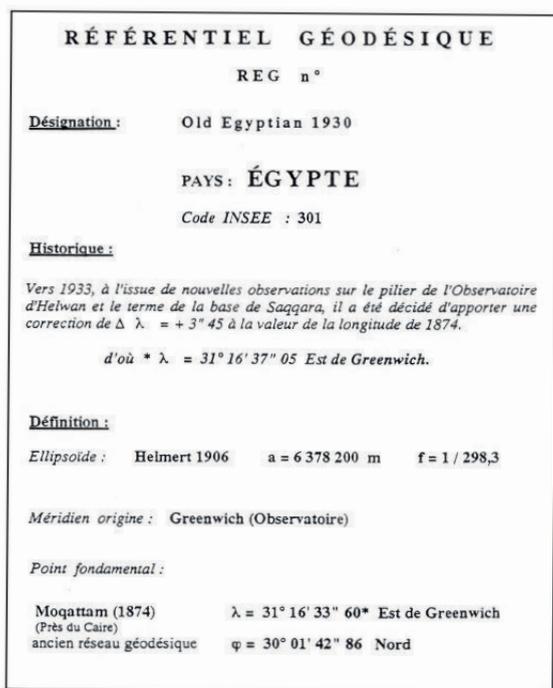


Figure 14 : Paramètres du système « Old Egyptian 1930 » (Égypte 1907), d'après la fiche de la base de données géodésique de l'IGN (IGN 1982). © Archives IGN, service de Géodésie et Nivellement

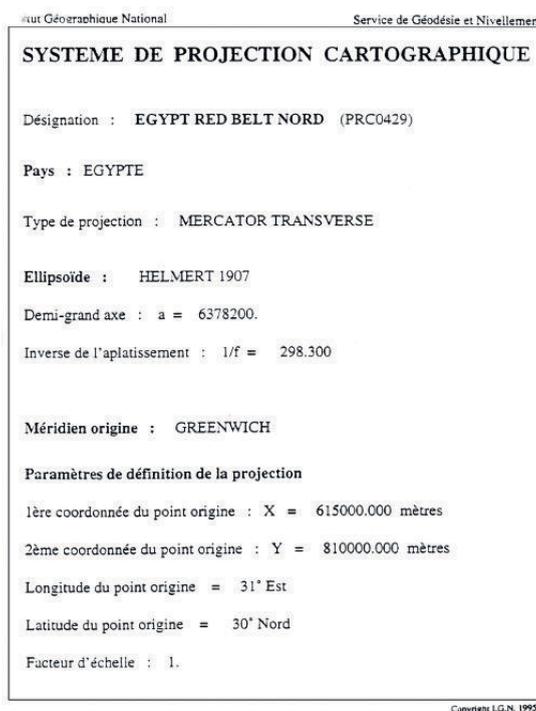


Figure 15 : Paramètres de la projection « Egypt Red Belt Nord », d'après la fiche de la base de données géodésique de l'IGN (IGN 1995). Dans l'actuelle base de données de l'IGN, l'ellipsoïde a été corrigé en Helmert 1906. © Archives IGN, service de Géodésie et Nivellement



Figure 16 : Paramètres de la projection « Egypt Red Belt Sud », d'après la fiche de la base de données géodésique de l'IGN (IGN 1995). Dans l'actuelle base de données de l'IGN, l'ellipsoïde a été corrigé en Helmert 1906. © Archives IGN, service de Géodésie et Nivellement

L'analyse des informations ci-dessus recensées nous a permis de proposer une carte de synthèse des projections ETM (fig. 17).

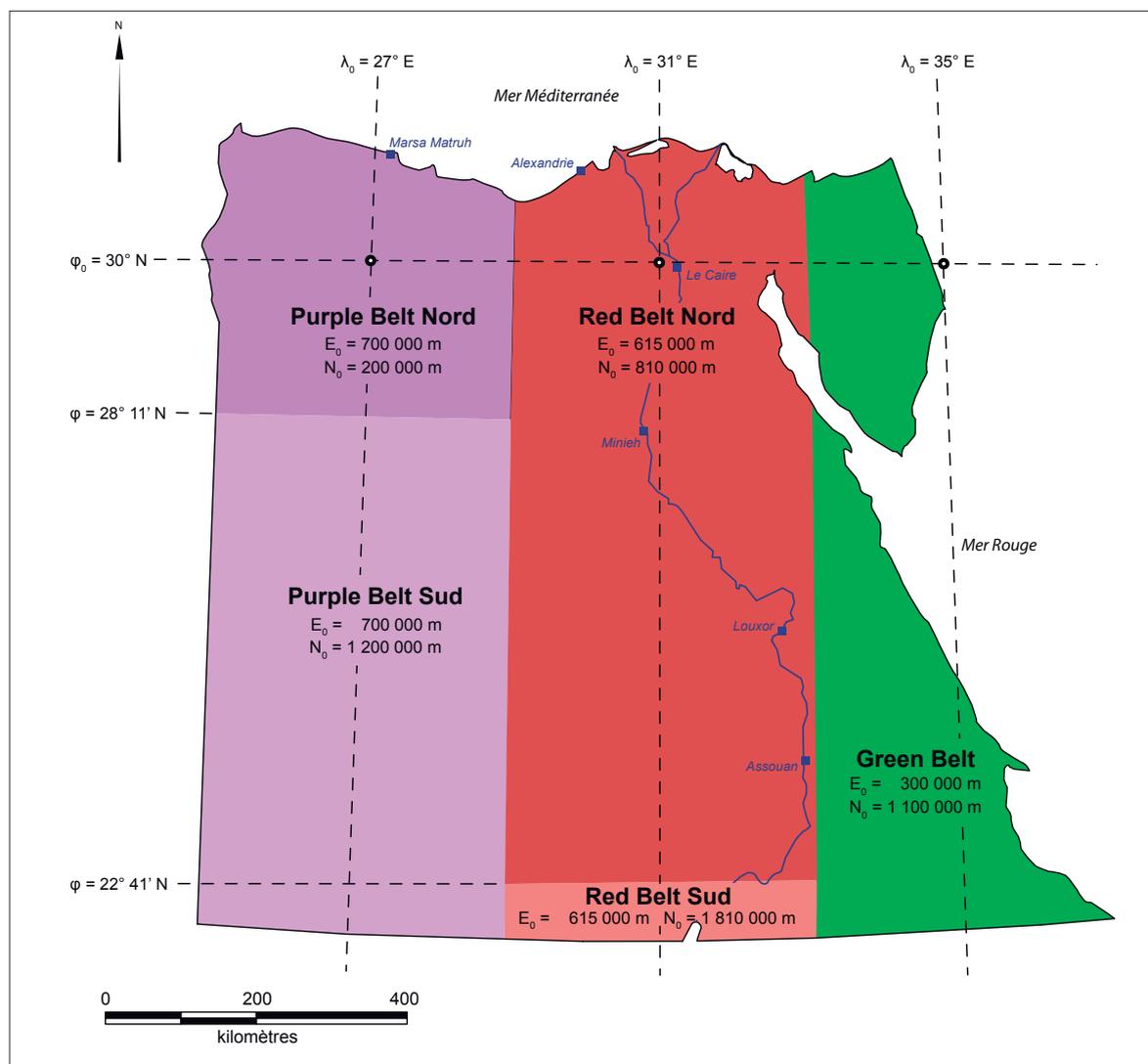


Figure 17 : Carte de synthèse des projections ETM. Dessin C. Shaalan, © Archives CEALex

Le système géodésique Égypte 1907 est le plus répandu dans la production cartographique égyptienne. À notre connaissance, depuis 1924, toutes les cartes topographiques réalisées par l'EGSA ont été dessinées dans ce système⁶⁹. Il est encore utilisé de nos jours, notamment pour la série de cartes au 1/50 000 dressée dans les années 1990 par l'EGSA, la spatiocarte⁷⁰ du Caire au 1/70 000 dressée en 2002 par l'EGSA, en collaboration avec IGN France International (IGN-FI)

69. À l'exception de la carte de l'oasis de Farafrah et du désert Blanc de 2003, 1/100 000, qui utilise le système NED 1995 (voir fig. 24).
 70. Une spatiocarte est une carte dont le fond n'est pas un dessin mais une ou plusieurs images obtenues par satellite et corrigées des imperfections dues au mode de prise de vue.

à partir d'images satellites produites par SPOT-Image, ou encore pour les cartes topographiques récentes de la région d'Alexandrie⁷¹. Il s'agit également du système de référence utilisé par le Centre d'Études Alexandrines.

Paramètres du système

Ellipsoïde : Helmert 1906 ($a = 6\,378\,200\text{ m}$; $f = 1/298,3$)

Méridien origine : Greenwich

Point fondamental : Station F1 (Moqattam)⁷²

$$\lambda = 31^{\circ} 16' 33,60'' \text{ E} \quad \varphi = 30^{\circ} 01' 42,86'' \text{ N}$$

Transformations géodésiques d'Égypte 1907 vers WGS 84

Les différences entre les ellipsoïdes Helmert 1906 et WGS 84 sont les suivantes :

$$da = -63 \text{ m}$$

$$df \times 10^4 = 0,004\,807\,955$$

Étant donné la longévité de ce système, les calculs de transformation d'Égypte 1907 vers WGS 84 sont nombreux. Pendant et suite à la mise en place des systèmes WGS 72 et WGS 84, la DMA a proposé deux jeux de paramètres, l'un en 1983 et l'autre en 1987, basés sur une transformation d'Helmert⁷³.

L'EPSG a publié dans sa base de données géodésiques des paramètres⁷⁴ utilisés pour la recherche pétrolière, calculés par le service britannique Mapping and Charting Establishment, sous les codes 1545 (Égypte 1907 vers WGS 72) et 8537 (Égypte 1907 vers WGS 84). Ces paramètres sont utilisés par la société Shell et également par l'Institut français d'archéologie orientale.

En 1990, Mohamed El Hosseney, dont la thèse de doctorat a porté sur la compensation du réseau géodésique égyptien⁷⁵, a proposé une transformation de Molodensky-Badekas d'Égypte 1907 vers WGS 72⁷⁶, qui n'a toutefois pas eu d'application pratique. En 1999, le Centre d'Études Alexandrines a calculé des paramètres de transformation d'Égypte 1907 vers WGS 84, offrant une précision d'environ 30 cm sur la ville d'Alexandrie⁷⁷. En 1995, l'EGSA releva, par GPS, 30 points du canevas de triangulation, afin d'établir un réseau de haute précision, appelé *High Accuracy Reference Network* (HARN)⁷⁸. La disponibilité de ces jeux de coordonnées précises a généré de nombreuses tentatives pour calculer une transformation applicable à toute l'Égypte⁷⁹. Malgré la diversité des méthodes utilisées⁸⁰, aucune solution permettant une précision submétrique sur tout le pays n'a pu être trouvée. Remarquons toutefois les deux jeux de paramètres de transformation suivants :

71. Par exemple, les plans de la série 1/5 000, des années 2000-2010, consultés à la Bibliotheca Alexandrina.

72. IGN 1982, fiche « Référentiel Géodésique Old Egyptian 1930 » ; EPSG 2016, *Geographic CRS*, code 4229.

73. DMA 1983a, p. 11 ; NIMA 2000, append. B.2-6.

74. EPSG 2016, *Geodetic Transformation*.

75. EL HOSSSENY 1982.

76. EL HOSSSENY 1990.

77. MEULIEN 1999.

78. MINA 2006, [p. 1].

79. SHAKER *et al.* 2007, p. 2-3.

80. Transformations d'Helmert, de Molodensky-Badekas, calcul des paramètres avec pondération des points d'appui, polynomiale, etc.

- En 2006, Ehab Mina a proposé une transformation de Molodensky-Badekas qui permet une répartition homogène des écarts sur toute l'Égypte⁸¹. La précision constatée est ainsi la meilleure parmi les transformations testées.
- En 2007, Ahmed Shaker a déterminé plusieurs jeux de paramètres en recalculant le réseau de triangulation et en pondérant les stations d'appui⁸². Les meilleurs résultats ont été obtenus avec le jeu n° 7 (Shaker 2007-7), qui permet d'obtenir une bonne précision le long de la vallée du Nil, avec un écart maximal de 5 mètres. Ceci au prix de résultats moyens dans le désert Libyque, qui affectent la précision globale de la transformation.

Nous avons retenu six transformations entre Égypte 1907 et WGS 84, ce qui pour un même système géodésique demeure un nombre important. Les choix possibles sont étudiés au § 4.4. Les paramètres des transformations retenues figurent dans le **tableau 2**, dans le sens Égypte 1907 vers WGS 84. Le paramètre σ indiqué correspond à l'erreur maximale probable pour 99 % des mesures⁸³.

Système de départ	Égypte 1907					
Système d'arrivée	WGS 84					
Nom de la transformation	DMA 1983	DMA 1987	EPSG 8537	CEAlex 1999	Mina 2006	Shaker 2007-7
Code EPSG	—	1148	8537	—	7697	—
d_x (m)	-120	-130	-121,8	-223,505	-127,535	88,832
d_y (m)	98	110	98,1	196,43	113,495	-186,714
d_z (m)	-11,5	-13	-10,7	-31,601	-12,7	-151,82
r_x (")	—	—	—	—	1,603 747	-1,305
r_y (")	—	—	—	—	-0,153 612	-6,001
r_z (")	0,554	—	0,554	-4,532 762	-5,364 408	11,276
D (ppm)	0,219 8	—	0,226 3	7,719 541	5,337 450	6,413
X_p (m)	—	—	—	—	4 854 969,728	—
Y_p (m)	—	—	—	—	2 945 552,013	—
Z_p (m)	—	—	—	—	2 868 447,61	—
σ 99 % (m)	11,1	10,5	11,2	9,9	8,7	15,4

Tableau 2 : Paramètres des transformations d'Égypte 1907 vers WGS 84

81. MINA 2006.

82. SHAKER *et al.* 2007.

83. L'erreur maximale indiquée pour les transformations d'Helmert a été établie en appliquant les paramètres de transformation sur 13 points relevés par la DMA en 1977-1978 avec une précision d'un mètre et sur les coordonnées de la station GPS permanente « ALEX » du Centre d'Études Alexandrines (voir § 4.3). Les fiches d'observations des 13 points relevés par la DMA nous ont été communiquées par St. Gruendler, CSAT Team, NIMA en 2003 (DMA 1978).

Projection associée

Egyptian Transverse Mercator (ETM), de type Mercator Transverse (voir fig. 17). Le facteur d'échelle est de 1 pour toutes les zones. Les coordonnées marquées d'un * pour les limites de zones sont des coordonnées planes de la projection (**tableau 3**).

Système géodésique		Égypte 1907								
Projection		Egyptian Transverse Mercator (ETM)								
Zone	Code EPSG	Point origine				Facteur d'échelle	Limites de zone			
		λ_0	φ_0	E_0 (m)	N_0 (m)		Ouest	Est	Nord	Sud
<i>Purple Belt Nord (Purple Belt)</i>	22993	27° E	30° N	700 000	200 000	1,0	25° E	29° E	34° N	0 m N* soit environ 28° 11' N
<i>Purple Belt Sud (Extended Purple Belt)</i>	22994			700 000	1 200 000				1 000 000 m N* soit environ 28° 11' N	19° N
<i>Red Belt Nord (Red Belt)</i>	22992	31° E	30° N	615 000	810 000		29° E	33° E	34° N	0 m N* soit environ 22° 41' N
<i>Red Belt Sud (Extended Red Belt)</i>	—			615 000	1 810 000				1 000 000 m N* soit environ 22° 41' N	19° N
<i>Green Belt (Blue Belt)</i>	22991	35° E	30° N	300 000	1 100 000		33° E	37° E	34° N	19° N

Tableau 3 : Paramètres des zones de la projection ETM

Certains GPS, comme les GPS de navigation de marque Garmin, ne permettent pas d'introduire la latitude du point origine de la projection (φ_0). Ce défaut est compensé en soustrayant à l'ordonnée du point origine de la projection (N_0), la distance entre le point origine et l'équateur mesurée le long du méridien origine. Par exemple, pour *Red Belt Nord*, les paramètres à introduire sont les suivants :

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 31^\circ \text{ E} & \varphi_0 &= 0^\circ \\ E_0 &= 615\,000 \text{ m} & N_0 &= -2\,510\,148,982 \text{ m} \end{aligned}$$

2.3. Adindan Datum

Appellations référencées : Adindan⁸⁴, Adindan Datum⁸⁵, Blue Nile 1958⁸⁶.

Le point le plus au sud de la chaîne de triangulation égyptienne, situé à Adindan, proche de la frontière soudanaise actuelle, a été utilisé vers 1930 comme point fondamental pour un nouveau système géodésique, appelé Adindan Datum⁸⁷. Ce système a été utilisé pour la cartographie du Soudan, mais comme le point fondamental était alors situé en Égypte, nous en faisons ici une brève mention.

Paramètres du système

Ellipsoïde : Clarke 1880 ($a = 6\,378\,249,145$ m ; $f = 1/293,465$)

Méridien origine : Greenwich

Point fondamental : Adindan, Station 15⁸⁸

$\lambda = 31^{\circ} 29' 21,6079''$ E $\varphi = 22^{\circ} 10' 07,1098''$ N

2.4. Égypte 1933

Appellations référencées : Egypt 1930⁸⁹, New Egyptian⁹⁰, New Egyptian Datum 1933 (1930)⁹¹.

En 1933, de nouvelles mesures effectuées à l'observatoire d'Helwan⁹² permirent d'établir que la détermination du point fondamental du système Égypte 1907 présentait une erreur en longitude de $-3,45''$. Toutefois, pour des raisons pratiques et vu le très grand nombre de cartes déjà produites, l'ancien système continua d'être utilisé. Nous proposons d'appeler ce système Égypte 1933 afin d'éviter la confusion avec Old Egyptian 1930, qui est un synonyme d'Égypte 1907.

Nous n'avons trouvé qu'une série utilisant le système Égypte 1933 : les plans topographiques au 1/5 000 et au 1/10 000 dressés pour les villes du Caire, d'Alexandrie et pour la région du canal de Suez par le consortium SFS⁹³/IGN en 1978, pour le compte du ministère égyptien de l'Habitat et de la Reconstruction⁹⁴ (**fig. 18**).

Paramètres du système

Ellipsoïde : International 1924⁹⁵ ($a = 6\,378\,388$ m ; $f = 1/297$)

Méridien origine : Greenwich

84. EPSG 2016, *Geographic CRS*, code 4201.

85. IGN 1982, fiche « Référentiel Géodésique Adindan Datum ».

86. EPSG 2016, *Geographic CRS*, code 4201.

87. IGN 1982, fiche « Référentiel Géodésique Adindan Datum ».

88. Terme de la base (IGN 1982, fiche « Adindan Datum ») ; EPSG 2016, *Geographic CRS*, code 4201.

89. EPSG 2016, *Geographic CRS*, code 4199.

90. EPSG 2016, *Geographic CRS*, code 4199.

91. Base de données géodésique de l'IGN, extraction du 05/01/2018, code 830.

92. COLE 1944, p. 57 ; IGN 1982, fiche « Référentiel Géodésique Old Egyptian 1930 ».

93. Société française de stéréotopographie.

94. Sur cette série de carte, aucune mention du système géodésique n'est faite. Seuls l'ellipsoïde (International-Hayford 1909) et la projection (UTM-Fuseau 36) apparaissent. Toutefois, le système géodésique a été identifié et contrôlé par les auteurs à partir de points connus sur la ville d'Alexandrie (voir § 4.4).

95. Appelé également International Hayford 1909 ou Hayford 1909.

Point fondamental : Station F1 (Moqattam) corrigée de +3,45" en longitude

$$\lambda = 31^{\circ} 16' 37,05'' \text{ E} \quad \varphi = 30^{\circ} 01' 42,86'' \text{ N}$$

Transformations géodésiques

Transformation d'Égypte 1933 vers Égypte 1907

Le calcul des paramètres de transformation est détaillé au § 4.5.

$$d_x = -156,558 \text{ m}$$

$$d_y = -95,099 \text{ m}$$

$$d_z = -11,733 \text{ m}$$

$$r_z = -3,45''$$

Transformation d'Égypte 1933 vers WGS 84

Les différences entre les ellipsoïdes International 1924 et WGS 84 sont les suivantes :

$$da = -251 \text{ m}$$

$$df \times 10^4 = -0,141 \ 927 \ 023$$

Pour obtenir les paramètres de transformation d'Égypte 1933 vers WGS 84, il suffit d'ajouter les paramètres ci-dessus à ceux utilisés pour la conversion d'Égypte 1907 vers WGS 84. Par exemple, à partir de la transformation DMA 1987, on obtient les paramètres suivants (indiqués dans le tableau 7, plus bas) :

$$d_x = -286,558 \text{ m}$$

$$d_y = 14,901 \text{ m}$$

$$d_z = -24,733 \text{ m}$$

$$r_z = -3,45''$$

Projection associée

Universal Transverse Mercator (UTM) zones 35 et 36 Nord (tableau 4)

Système géodésique		Égypte 1933 (code EPSG : 4199)						
Projection		Universal Transverse Mercator						
Zone	Code EPSG	Point origine				Facteur d'échelle (ppm)	Limites	
		λ_0	φ_0	E_0 (m)	N_0 (m)		Ouest	Est
35 Nord	16035	27° E	0° N	500 000 m	0 m	0,9996	24° E	30° E
36 Nord	16036	33° E					30° E	36° E

Tableau 4 : Paramètres de la projection UTM, zones 35 et 36 Nord

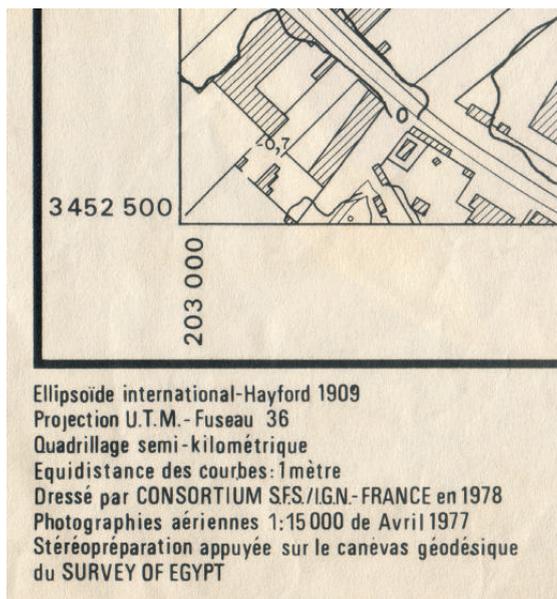


Figure 18 : Extrait du plan E7 d'Alexandrie, SFS/IGN, 1978, 1/5 000. © Archives CEALex

2.5. Pulkovo 1942

Appellations référencées : Pulkovo 1942⁹⁶, S-42⁹⁷, Sistema koordinat 1942⁹⁸.

L'ancienne Union soviétique a produit, à partir des années 1970⁹⁹, une cartographie complète de l'Afrique qui, ces dernières années, a connu une diffusion importante en Occident. Ces cartes sont en effet devenues souvent plus faciles à se procurer que celles réalisées par les organismes nationaux des pays concernés, aussi rencontrent-elles un certain succès auprès des voyageurs et des agences organisatrices de treks. Pour l'Égypte, nous avons consulté une couverture complète à l'échelle du 1/500 000 et deux cartes de la région du Fayoum au 1/200 000 (années 1970-1980).

Le système géodésique utilisé sur ces cartes s'appuie sur le *datum* Pulkovo 1942. Nous n'avons pas trouvé les paramètres de conversion entre Pulkovo 1942 et WGS 84 spécifiques pour l'Égypte. Toutefois, les paramètres publiés pour la Russie¹⁰⁰ sont d'une précision suffisante pour l'utilisation des cartes au 1/200 000. La projection associée, appelée Gauss-Krüger, est de type Mercator Transverse, et s'applique sur des fuseaux de 6 degrés de largeur. L'Égypte est couverte par deux zones, la zone 5 entre le 24° et le 30° méridien, et la zone 6 entre le 30° et le 36° méridien¹⁰¹. La carte à l'échelle 1/200 000 consultée, couvrant la région du Fayoum¹⁰², est réalisée suivant un carroyage Gauss-Krüger zone 6, mais présente aussi, à l'extérieur du cadre, les amorces d'une grille Gauss-Krüger zone 5.

Paramètres du système

Ellipsoïde : Krassowsky 1940 ($a = 6\,378\,245\text{ m}$; $f = 1/298,3$)

Méridien origine : Greenwich

Point fondamental : Observatoire de Pulkovo (Russie)

$\lambda = 30^{\circ} 19' 42,090'' \text{ E}$ $\varphi = 59^{\circ} 46' 18,550'' \text{ N}$

Transformation géodésique de Pulkovo 1942 vers WGS 84

Les différences entre les ellipsoïdes Krassowsky 1940 et WGS 84 sont les suivantes :

$da = -108\text{ m}$

$df \times 10^4 = 0,004\,807\,955$

Les paramètres de la transformation d'Helmert sont¹⁰³ :

$d_x = 28\text{ m}$

$d_y = -130\text{ m}$

$d_z = -95\text{ m}$

96. EPSG 2016, *Geographic CRS*, code 4284.

97. EPSG 2016, *Geographic CRS*, code 4284.

98. Cartes russes au 1/200 000, années 1970-1980.

99. Voir à ce sujet <https://le-cartographe.net/dossiers-carto/asie/69cartomilirusse>.

100. NIMA 2000, append. C.2-2.

101. EPSG 2016, *Projected CRS*, codes 28405 et 28406.

102. Carte H-36-XIX (SINNOURIS), 1985.

103. NIMA 2000, append. C.2-2; EPSG 2016, *Geodetic Transformation*, code 1254.

Projection associée

Gauss-Krüger zones 5 et 6 (de type Mercator Transverse).

Le facteur d'échelle est de 1, la latitude du point origine (φ_0) est de 0° et la coordonnée plane Nord (N_0) de 0 m pour toutes les zones (**tableau 5**).

Système géodésique		Pulkovo 1942 (code EPSG : 4284)						
Projection		Gauss-Krüger						
Zone	Code EPSG	Point origine				Facteur d'échelle (ppm)	Limites	
		λ_0	φ_0	E_0 (m)	N_0 (m)		Ouest	Est
5	28405	27° E	0° N	5 500 000	0	1,0	24° E	30° E
6	28406	33° E		6 500 000			30° E	36° E

Tableau 5 : Paramètres de la projection Gauss-Krüger, zones 5 et 6

2.6. European Datum 1950

Appellations référencées : ED50¹⁰⁴, EUR¹⁰⁵, European Datum 1950¹⁰⁶, Réseau géodésique européen compensé¹⁰⁷.

Ce système géodésique a été réalisé par l'unification et la compensation des chaînes de triangulation nationales couvrant l'Europe. Il a ensuite été étendu à l'Égypte et au Proche-Orient. Ayant subi la concurrence des systèmes mondiaux WGS 72 puis WGS 84, il n'est plus guère utilisé aujourd'hui. L'EPSG signale l'emploi de ce système pour la recherche pétrolière dans le désert Libyque¹⁰⁸. On le retrouve aussi mentionné sur les cartes aéronautiques *Operational Navigation Charts* (ONC) et *Tactical Pilotage Charts* (TPC) d'avant 1990, ainsi que sur certaines cartes marines antérieures à 1990¹⁰⁹ (**fig. 19**).



Figure 19 : Extrait de la carte marine « Baie de Suez » n° 7013, SHOM, 1986/1989, 1/35 000. © Archives CEALex

104. NIMA 2000, append. F-3 ; EPSG 2016, *Geographic CRS*, code 4230.

105. NIMA 2000, append. B.2-4.

106. NIMA 2000, append. F-3 ; EPSG 2016, *Geographic CRS*, code 4230.

107. Carte marine « Baie de Suez » n° 7013 (SHOM, 1986/1989, 1/35 000), voir fig. 19.

108. EPSG 2016, *Geodetic Transformation*, code 1810.

109. Par exemple, les cartes du Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM) français, Alexandrie 1989 et Golfe de Suez 1980.

Paramètres du système

Ellipsoïde : International 1924 ($a = 6\,378\,388$ m ; $f = 1/297$)

Méridien origine : Greenwich

Point fondamental : Tour Helmert à Potsdam (Allemagne)

$$\lambda = 13^{\circ} 03' 58,9283'' \text{ E}^{110} \quad \varphi = 52^{\circ} 22' 51,4456'' \text{ N}$$

Transformation géodésique d'European Datum 1950 vers WGS 84

Les différences entre les ellipsoïdes International 1924 et WGS 84 sont les suivantes :

$$da = -251 \text{ m}$$

$$df \times 10^4 = -0,141\,927\,023$$

Les paramètres moyens, couvrant toute la zone d'application du système (Europe), correspondent à la transformation appelée EUR-M¹¹¹ :

$$d_x = -87 \text{ m}$$

$$d_y = -98 \text{ m}$$

$$d_z = -121 \text{ m}$$

Les paramètres spécifiques à l'Égypte, correspondent à la transformation appelée EUR-F¹¹² (voir tableau 7) :

$$d_x = -130 \text{ m}$$

$$d_y = -117 \text{ m}$$

$$d_z = -151 \text{ m}$$

514

Projections associées

Universal Transverse Mercator (UTM)

Projection Mercator pour les cartes marines

2.7. S.650 TL Network

Appellations référencées : Egypt Gulf of Suez S-650 TL¹¹³, Gulf of Suez satellite network¹¹⁴, S-650 Datum¹¹⁵, S-650 DMX¹¹⁶, S-650 TL¹¹⁷, S.650 T.L. Network¹¹⁸.

Ce système a été utilisé par des compagnies pétrolières pour dresser des cartes de position des conduites de fluides. Il s'appuie sur un point fondamental (S.650) rattaché en coordonnées grâce à

110. D'après la bibliographie récente, DMA 1990, 2-2. Des documents antérieurs, dont DMA 1987, 2-2, font état d'une autre longitude : $\lambda = 13^{\circ} 03' 58,741'' \text{ E}$.

111. NIMA 2000, append. B.5-1, EUR-M ; EPSG 2016, *Geodetic Transformation*, code 1133.

112. NIMA 2000, append. B.2-4, EUR-F ; EPSG 2016, *Geodetic Transformation*, code 1137.

113. EPSG 2016, *Geographic CRS*, code 4706.

114. EGYPTIAN SURVEYS LIMITED s. d., p. 3.

115. EGYPTIAN SURVEYS LIMITED s. d., p. 3.

116. EGYPTIAN SURVEYS LIMITED s. d., p. 3.

117. EPSG 2016, *Geographic CRS*, code 4706.

118. IGN 1982, fiche « S.650 T.L. Network ». La mention erronée « 5.650 T.L. Network », initialement portée sur la fiche, a été corrigée par l'IGN.

l'ancien système satellite américain TRANSIT, antérieur au GPS, qui a permis de calculer le *World Geodetic System*. On peut donc estimer que le système S.650 est antérieur au calcul du *World Geodetic System* établi en 1972. Des paramètres de translation étaient appliqués afin d'obtenir, au final, des coordonnées proches du système Égypte 1907, avec une précision de 20 mètres¹¹⁹.

Paramètres du système

Ellipsoïde : Helmert 1906 ($a = 6\,378\,200\text{ m}$; $f = 1/298,3$)¹²⁰

Méridien origine : Greenwich

Point fondamental : S-650 DMX¹²¹

$$\lambda = 33^{\circ} 06' 36,6344'' \text{ E} \quad \varphi = 28^{\circ} 19' 02,1907'' \text{ N}$$

Transformation géodésique de S.650 TL vers WGS 84

Les différences entre les ellipsoïdes Helmert 1906 et WGS 84 sont les suivantes :

$$da = -63 \text{ m}$$

$$df \times 10^4 = 0,004\,807\,955$$

Les paramètres de transformation du *datum satellite Broadcast Ephemeris* vers S.650 TL¹²² :

$$d_x = +123 \text{ m}$$

$$d_y = -98 \text{ m}$$

$$d_z = -2 \text{ m}$$

Le *datum satellite* en question est le WGS 72 BE, version provisoire du WGS 72. À partir des paramètres publiés par l'IGN pour ce *datum*¹²³, nous pouvons calculer une transformation de S.650 TL vers WGS 84 (voir tableau 7) :

$$d_x = -123,8 \text{ m}$$

$$d_y = 98,2 \text{ m}$$

$$d_z = 3,9 \text{ m}$$

$$r_x = -0,047''$$

$$r_y = 0,019''$$

$$r_z = 0,808''$$

$$D = -0,387\,26 \text{ ppm}$$

L'EPSG signale également deux transformations de S.650 TL vers WGS 84 sous les codes 8657 et 15846¹²⁴.

119. EGYPTIAN SURVEYS LIMITED s. d., p. 3 ; IGN 1982, fiche « Référentiel Géodésique S.650 T.L. Network ».

120. Dans la base de données géodésique de l'IGN, cet ellipsoïde a été enregistré sous le nom Helmert 1907 avec les paramètres $a = 6\,378\,200\text{ m}$ et $b = 6\,356\,818,170\text{ m}$, à partir de données issues de leurs archives (301.02.01).

121. EPSG 2016, *Geographic CRS*, code 4706.

122. IGN 1982, fiche « Référentiel Géodésique S.650 T.L. Network » ; EPSG 2016, *Geodetic Transformation*, code 15792.

123. BOUCHER 1979, p. 5.

124. EPSG 2016, *Geodetic Transformation*.

Projection associée

*Red Belt*¹²⁵, de type Mercator Transverse (mêmes paramètres qu'ETM *Red Belt*, voir tableau 3). Toutefois, nous n'avons jamais eu l'opportunité de consulter des cartes établies dans ce système.

2.8. WGS 72

Appellations référencées : WGS 72¹²⁶, World Geodetic System 1972¹²⁷.

À la fin des années 1950, les systèmes géodésiques en place étaient limités à leurs aires d'applications et ils ne permettaient pas de calculs aisés sur des mesures intercontinentales. Le ministère de la Défense des États-Unis, Department of Defense (DoD), commença alors à rassembler des données en vue d'établir un système géodésique mondial. Ces données, consistant en des mesures gravimétriques terrestres, des mesures astrogéodésiques, des mesures de distances intercontinentales par trilatération et l'observation de la trajectoire d'un satellite, permirent la création du *World Geodetic System* en 1960 (WGS 60). Les progrès rapides dans l'utilisation des satellites artificiels pour des mesures optiques et Doppler permirent deux évolutions successives du système, tout d'abord en 1966 (WGS 66), puis en 1972, par la création du *World Geodetic System 1972* (WGS 72)¹²⁸. La mise en place du WGS 72 a marqué le début d'une série de campagnes de mesures par la DMA dans le monde entier, visant à y rattacher les multiples systèmes géodésiques locaux.

En Égypte, ces opérations eurent lieu en 1977 et 1978¹²⁹. Quatorze points géodésiques connus furent observés par mesures Doppler sur au moins deux satellites. Les coordonnées de ces points furent calculées dans le système WGS 72 avec une précision de 1,5 m (dans 90 % des cas). Le système WGS 72 a été retenu en 1986-1987 par The Egyptian General Petroleum Corporation/CONOCO, pour dresser les cartes géologiques de l'Égypte à l'échelle 1/500 000 (**fig. 20**). On le retrouve également parfois utilisé sur les cartes marines (**fig. 21**).

516

Paramètres du système

Ellipsoïde : WGS 72 ($a = 6\,378\,135\text{ m}$; $f = 1/298,26$)

Méridien origine : Greenwich

Transformation géodésique de WGS 72 vers WGS 84

Les différences entre les ellipsoïdes WGS 72 et WGS 84 sont les suivantes :

$da = 2\text{ m}$

$df \times 10^4 = 0,000\,312\,106$

125. IGN 1982, fiche « Référentiel Géodésique S.650 T.L. Network » ; EPSG 2016, *Projected CRS*, code 3355.

126. EPSG 2016, *Geographic CRS*, code 4985.

127. EPSG 2016, *Geographic CRS*, code 4985.

128. DMA 1983b.

129. DMA 1978.

Cartographic Supervision: G. Pöhlmann.
 Topographic Edition and Compilation: R. Fode, M. Hermina.

Universal Transverse Mercator Projection (UTM),
 UTM Grid Zone 35, Central Meridian 27° East, WGS 72 Spheroid.

Topography based on Egypt 1: 250 000, Working Sheet Series, Sheets:
 NH-35-K, -L, -O and -P, Berlin 1982, revised by M. Hermina, Cairo 1984/85.
 Additional Topographic Sources: Topographical map of Egypt 1: 100 000,
 Cairo 1949 – 1950; Egypt 1: 100 000, Cairo 1937 – 1939; Egypt 1: 500 000, Sheets 1,2,
 Cairo 1942; Nautical Chart 1: 500 000, Sheet 3356, London 1980.

Geomagnetic declination to epoch 1985 for the center of the sheet ALEXANDRIA
 = 1°45'; annual variation = +2'. Provided by Academy of Scientific Research and
 Technology, Helwan Institute of Astronomy and Geophysics, Helwan, Egypt.

Satellite Control Point Determination: B. Meissner, G. Kramer, F.K. List,
 G. Pöhlmann, U. Ripke, R. Hildebrandt.
 Transfer of Geological Interpretation to Map: U. Ripke.
 Technical Assemblage and Production: V. Zirn, M. Deetz.
 Process Photography and Photo Composition: P. Haase, V. Zirn.

Printed in Germany by Institut für Angewandte Geodäsie, Berlin.
 © Technische Fachhochschule Berlin, 1986.

Figure 20 : Extrait de la carte géologique NH 35 NE « Alexandria », The Egyptian General Petroleum Corporation/CONOCO, 1986, 1/500 000. © Archives CEALex



Figure 21 : Encadré « Marsa Halâ'ib » (1/35 000) de la carte marine « Mer Rouge – Partie centrale de Abû el Kizân à l'archipel Sawâkin » n° 7112, SHOM, 1988/1993, 1/700 000. © Archives CEALex

Les paramètres de transformation d'Helmert sont :

$$d_z = 4,5 \text{ m}$$

$$r_z = 0,554''$$

$$D = 0,219 \text{ 8 ppm}^{130}$$

Projections associées

Universal Transverse Mercator (UTM) (voir fig. 20)

Projection Mercator pour les cartes marines (voir fig. 21)

2.9. EGN 80

Appellations référencées : Geodetic Network (EGN 80)¹³¹, Egyptian geodetic system (EGN 80)¹³², Egyptian Datum (Helwan)¹³³.

En 1982, Mohamed El Hosseny effectua un nouveau calcul d'ajustement du réseau géodésique égyptien¹³⁴. Cet ajustement s'appuyait sur les dernières coordonnées astronomiques mesurées pour la station O1 de l'observatoire d'Helwan et sur l'ellipsoïde d'Helmert 1906. Dans ses fiches des référentiels géodésiques, l'IGN mentionne ce système sous le nom d'*Egyptian Datum (Helwan)*¹³⁵, en lui associant les projections *Purple Belt* et *Red Belt*. Mais El Hosseny n'aborde pas la question des projections cartographiques dans ses travaux. De plus, à notre connaissance, ce système n'a pas eu d'utilisation pratique en cartographie.

518

Paramètres du système

Ellipsoïde : Helmert 1906 ($a = 6\,378\,200 \text{ m}$; $f = 1/298,3$)

Méridien origine : Greenwich

Point fondamental : Station O1 (Helwan)

$$\lambda = 31^\circ 20' 34,830 \text{ 0}'' \text{ E} \quad \varphi = 29^\circ 51' 33,332 \text{ 4}'' \text{ N}^{136}$$

Transformation géodésique d'EGN 80 vers WGS 84

Les différences entre les ellipsoïdes Helmert 1906 et WGS 84 sont les suivantes :

$$da = -63 \text{ m}$$

$$df \times 10^4 = 0,004 \text{ 807 955}$$

130. BOUCHER 1987. Paramètres utilisés par l'IGN, com. pers. Thierry Gattacceca, service de Géodésie et Nivellement, juin 2004. L'EPSG donne pour cette transformation deux facteurs d'échelle : $D = 0,219 \text{ ppm}$ (EPSG 2016, *Geodetic Transformation*, code 1238) ou $D = 0,2263 \text{ ppm}$ (code 1237).

131. EL HOSSSENY 1982, p. 130.

132. EL HOSSSENY 1982, p. 98.

133. IGN 1982, fiche « Egyptian datum (Helwan) ».

134. EL HOSSSENY 1982.

135. IGN 1982, fiche « Egyptian datum (Helwan) ».

136. EL HOSSSENY 1982, p. 57.

Les paramètres de transformation d'Helmert sont¹³⁷ :

$$d_x = -66,69 \text{ m}$$

$$d_y = 17,64 \text{ m}$$

$$d_z = -17,13 \text{ m}$$

$$r_z = 0,554''$$

$$D = 0,2198 \text{ ppm}$$

2.10. WGS 84

Appellations référencées : WGS 84¹³⁸, World Geodetic System 1984¹³⁹.

Ultime détermination du *World Geodetic System* américain en 1984, le WGS 84 est le système géodésique utilisé par le GPS. Les cartes aéronautiques ONC et TPC de 1990 et postérieures, ainsi que les cartes marines récentes sont dressées dans ce système. Le nouveau système géodésique égyptien *New Egyptian Datum* 1995 (NED 1995), décrit ci-après, est également rattaché au WGS 84.

Paramètres du système

Ellipsoïde : WGS 84 ($a = 6\,378\,137 \text{ m}$; $f = 1/298,257\,223\,563$)

Méridien origine : Greenwich

Projections associées

Universal Transverse Mercator (UTM)

Projection Mercator pour les cartes marines (fig. 22)

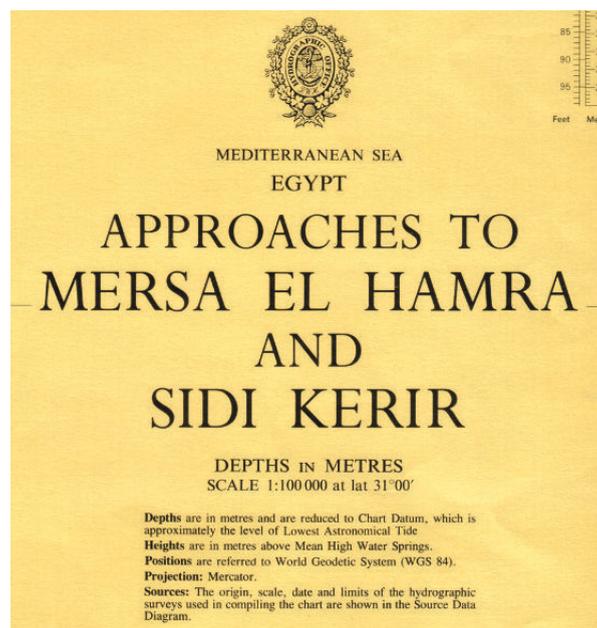


Figure 22 : Extrait de la carte marine « Mersa el Hamra and Sidi Kerir » n° 3325, Hydrographic Office, 1982/1989/1996, 1/100 000. © Archives CEAlex

137. Calculés d'après la transformation EGN 80 vers WGS 72, EL HOSSENY 1981, p. 13.

138. EPSG 2016, *Geographic CRS*, code 4979.

139. EPSG 2016, *Geographic CRS*, code 4979.

2.11. NED 95

Appellations référencées : Modified Egypt Transverse Mercator (METM)¹⁴⁰, Modified Transverse Mercator (MTM)¹⁴¹, New Egyptian Datum 1995 (NED 95)¹⁴².

L'usage de plus en plus répandu du GPS, aussi bien en cartographie qu'en topographie, a conduit l'EGSA à publier, en 1995, un nouveau système géodésique basé sur le système WGS 84¹⁴³. Ce système s'appuie sur le réseau HARN constitué de 30 stations, régulièrement réparties sur l'ensemble du territoire égyptien, lesquelles ont été rattachées en WGS 84 avec une précision centimétrique¹⁴⁴. Pour les coordonnées planes, une nouvelle projection a été créée, de type Mercator Transverse, découpant l'Égypte en cinq zones¹⁴⁵ (fig. 23).

À notre connaissance, ce système a été utilisé ponctuellement au début des années 2000 pour certains projets. À ce jour, nous n'avons recensé que la spatiocarte à l'échelle 1/100 000 de l'oasis de Farafrah et du désert Blanc (série *Satellite Tourist Map*), éditée en 2003 par l'EGSA, avec la collaboration d'IGN-FI (fig. 24).

Paramètres du système

Ellipsoïde : WGS 84 ($a = 6\,378\,137\text{ m}$; $f = 1/298,257\,223\,563$)

Méridien origine : Greenwich

Datum : WGS 84

140. AWWAD 2016, p. 58-59. Par abus de langage, la projection est assimilée au système géodésique.

141. Spatiocarte « Farafrah Oasis - White Desert, Satellite Tourist Map » (EGSA/IGN France International, 2003, 1/100 000, voir fig. 24). Par abus de langage, la projection est assimilée au système géodésique.

142. EGSA 1995.

143. EGSA 1995 ; AWWAD 2016, p. 59.

144. À partir de quatre stations permanentes du réseau de l'International GPS Service for Geodynamics (IGS) : Matera (Italie), Maspalomas (Îles Canaries, Espagne), Hartebeesthoek (Afrique du Sud) et Kitab (Ouzbékistan), EGSA 1995, p. 6.

145. Suivant les documents, ces zones sont numérotées d'ouest en est, de 1 à 5 (EGSA 1995 ; EGSA 2004, p. 64, 119) ou nommées par des couleurs *Red*, *Green*, *Brown*, *Purple* et *Blue* (AWWAD 2016, p. 59).

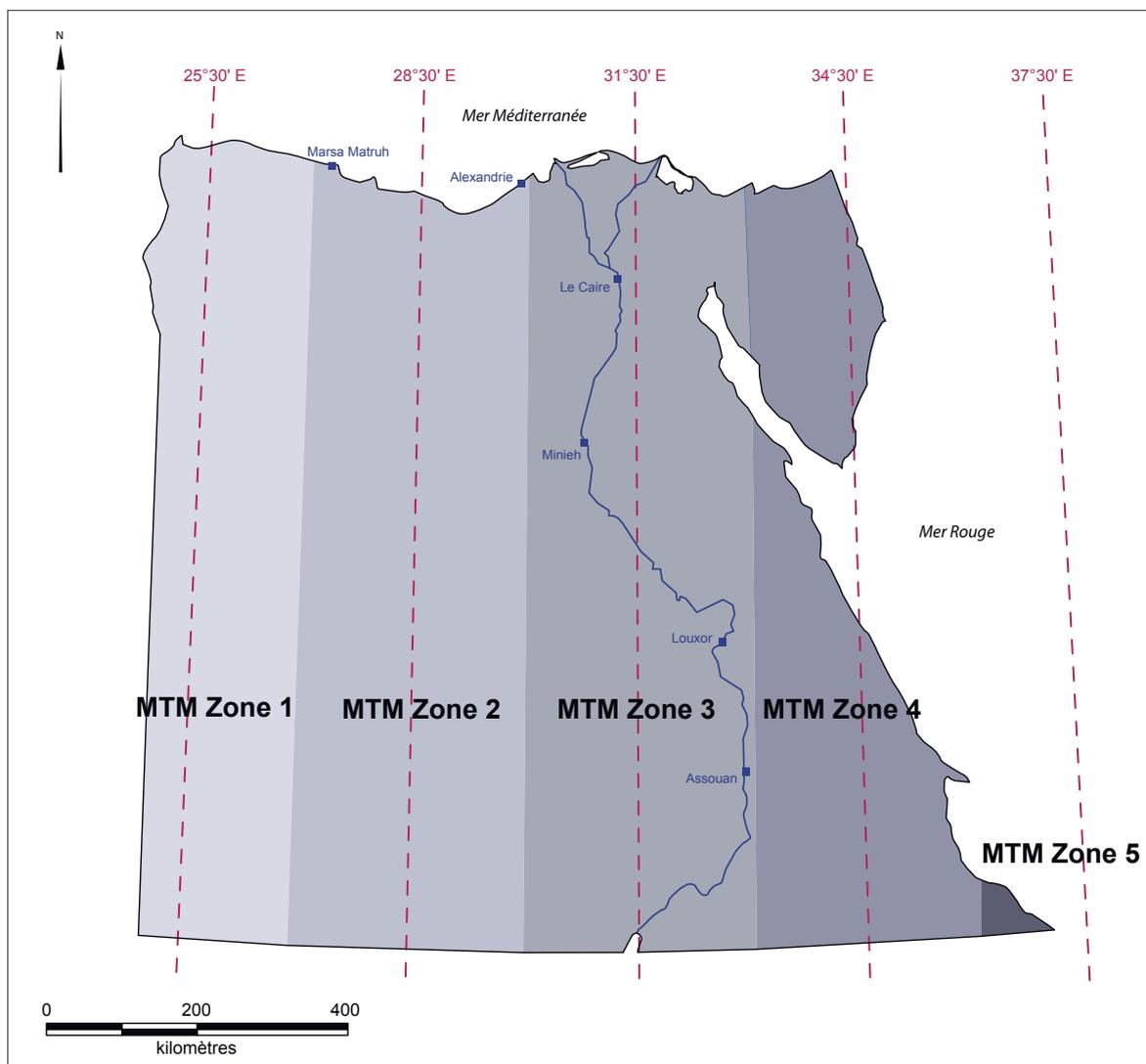


Figure 23 : Carte des différentes zones de la projection MTM, d'après EGSA 1995. Dessin C. Shaalan, © Archives CEALex

Scale 1 : 100,000 (1cm = 1km) مقياس الرسم ١ : ١٠٠٠٠٠

Inner grid: Cartographic coordinates
 Modified Transverse Mercator (MTM) Zone 2 (27°E - 30°E)
 Central meridian at 28°30' E

Outer grid: Geographic coordinates (latitude / longitude)

First edition 2003. Map produced by EGSA with technical assistance from IGN France International, and financial support from the French Food Aid Counterpart Funds (BLAFE).

الطبعة الأولى ٢٠٠٣ - أنتجت الخريطة بمعرفة الهيئة المصرية العامة للمساحة بالتعاون مع المعهد الوطني الجغرافي الفرنسي (IGN) وذلك من خلال حصة فائض بيع المعونات الغذائية الفرنسية .

Figure 24 : Extrait de la spatiocarte « Farafrah Oasis - White Desert, Satellite Tourist Map », EGSA/IGN-FI, 2003, 1/100 000. © Archives CEALex

*Projection associée*Modified Transverse Mercator (MTM), de type Mercator Transverse (**tableau 6**).

Système géodésique		NED 95						
Projection		Modified Transverse Mercator (MTM)						
Zone	Code EPSG	Point origine				Facteur d'échelle (ppm)	Limites	
		λ_0	φ_0	E_0 (m)	N_0 (m)		Ouest	Est
1	—	25°30' E	0° N	300 000	0	0,9999	Frontière ouest	27° E
2	—	28°30' E					27° E	30° E
3	—	31°30' E					30° E	33° E
4	—	34°30' E					33° E	36° E
5	—	37°30' E					36° E	Mer Rouge

Tableau 6 : Paramètres des zones de la projection MTM

2.12. Tableau récapitulatif des paramètres de transformation

Les paramètres de transformation des principaux systèmes utilisés en Égypte vers WGS 84 sont présentés dans le **tableau 7** ci-contre. Les paramètres de transformation d'Égypte 1907 vers WGS 84 ont été présentés plus haut dans le tableau 2.

Système de départ	Égypte 1933	Pulkovo 1942	ED 50 (EUR-F)	S.650 TL	WGS 72	EGN 80
Système d'arrivée	WGS 84					
Code EPSG de la transformation	—	1254	1137	—	1238	—
da (m)	-251	-108	-251	-63	2	-63
$df \times 10^4$	-0,141 927 023	0,004 807 955	-0,141 927 023	0,004 807 955	0,000 312 106	0,004 807 955
d_x (m)	-286,558	28	-130	-123,8	—	-66,69
d_y (m)	14,901	-130	-117	98,2	—	17,64
d_z (m)	-24,733	-95	-151	3,9	4,5	-17,13
r_x (")	—	—	—	-0,047	—	—
r_y (")	—	—	—	0,019	—	—
r_z (")	-3,45	—	—	0,808	0,554	0,554
D (ppm)	—	—	—	-0,387 26	0,219 8	0,219 8

Tableau 7 : Paramètres de transformation des différents systèmes (autres qu'Égypte 1907) vers WGS 84

3. Identification du système de coordonnées d'une carte d'Égypte

Quel est le système de coordonnées de cette carte? Telle est en effet la question que s'est posée plus d'un utilisateur déroulant une carte décrivant une portion du territoire égyptien. Y répondre est en effet crucial lorsque l'on veut déterminer les coordonnées d'un point représenté, ou y reporter un point relevé sur le terrain.

La première approche consiste à vérifier si l'échelle de la carte est suffisamment grande¹⁴⁶ pour qu'il soit nécessaire de se préoccuper du système géodésique. En effet, si l'erreur induite par un mauvais choix du système géodésique est inférieure à la précision graphique de la carte, n'importe quel système pourra être retenu.

Voyons les écarts planimétriques entre les principaux systèmes utilisés en Égypte et le WGS 84, pour le point de coordonnées 31° E et 30° N (en WGS 84) :

WGS 72 : 15 m

Égypte 1933 : 70 m

ED 50 : 128 m

Pulkovo 1942 : 139 m

Égypte 1907 : 162 m

L'écart maximal est de 162 mètres, avec le système Égypte 1907. Voyons maintenant à quelle distance correspond cet écart sur la carte, en fonction de l'échelle :

1/5 000 : 32 mm

1/10 000 : 16 mm

1/25 000 : 6 mm

1/50 000 : 3 mm

1/100 000 : 2 mm

1/200 000 : 0,8 mm

1/500 000 : 0,3 mm

1/1 000 000 : 0,16 mm

À partir de l'échelle 1/500 000 et en deçà (par exemple 1/1 000 000), les coordonnées relevées sur la carte pourront être considérées comme étant dans le système mondial WGS 84, les écarts étant inférieurs à la résolution graphique. En revanche, la détermination du système géodésique sera impérative pour les échelles supérieures à 1/500 000, par exemple 1/250 000. En l'absence d'indication précise ou de mention difficilement traduisible, le datum pourra être identifié en fonction de la provenance de la carte.

3.1. Plans et cartes topographiques de l'EGSA

Ces documents portent comme nom d'auteur Survey Department, Survey of Egypt, ESA ou EGSA. Les plus anciens sont en anglais. Les plus récents sont bilingues anglais/arabe, ou entièrement en arabe. Tous les documents que nous avons pu consulter étaient dans le système

146. Une échelle est dite « grande », si le rapport entre la distance sur le terrain et la distance sur la carte est élevé. C'est-à-dire que plus le dénominateur de l'échelle sera petit, plus l'échelle sera grande ; plus le dénominateur sera élevé, plus l'échelle sera petite. Par exemple, 1/500 est une grande échelle, tandis que 1/500 000 est une petite échelle. Une carte à grande échelle sera plus détaillée et donc couvrira un territoire plus restreint qu'une carte à petite échelle.

Égypte 1907, à l'exception d'une spatiocarte en NED 1995¹⁴⁷, réalisée à partir d'ortho-images satellites. Pour cette dernière, le système géodésique n'est pas mentionné, mais la projection indiquée (MTM) étant associée à NED 95, elle permet d'identifier formellement ce système.

Les premières cartes dressées dans le système Égypte 1907 ne portent pas de mention du système géodésique. Depuis les années 1980 et notamment la série du 1/50 000¹⁴⁸, les cartes publiées par l'EGSA portent les différentes mentions du système Égypte 1907 (National Geodetic Net. Venus 1874 ou National Geodetic Net. Az Zahrâ' 1874), des projections ou de l'ellipsoïde Helmert 1906 (voir fig. 10, 11, 12, 13).

Les plans cadastraux du Caire et d'Alexandrie (1933-1948)¹⁴⁹ ont été réalisés par le Survey of Egypt (aujourd'hui EGSA) dans le système Égypte 1907, aux échelles 1/500 et 1/1 000. Ils sont particulièrement utiles pour leur précision et pour la quantité de détails des éléments publics et surtout privés (limites de chaque unité de propriété et emprise des constructions, des cours et des passages). Le tableau d'assemblage d'Alexandrie comporte 655 planches à l'échelle 1/500 et 177 à l'échelle 1/1 000¹⁵⁰ pour les zones périphériques moins urbanisées à l'époque.

En 1995, l'EGSA a édité une série d'orthophotoplans¹⁵¹ à l'échelle 1/10 000, à partir de photographies aériennes des années 1991-1992. Ces documents mentionnent clairement le *datum* et la projection utilisés : « *Transverse Mercator Projection, Ellipsoïde Helmert 1906, Horizontal Datum National Geodetic Net., Venus 1874.* » (voir fig. 13). Les paramètres de la projection ETM sont également indiqués. Le système géodésique de ces plans est donc Égypte 1907.

3.2. Plans du consortium SFS/IGN

Ces plans aux échelles 1/5 000 et 1/10 000, réalisés en 1978 par le consortium SFS/IGN pour le ministère égyptien de l'Habitat et de la Reconstruction, à partir de photographies aériennes de 1977, couvrent le Caire, Alexandrie et le canal de Suez (voir fig. 18). Les écritures sont bilingues, en français et en arabe. Elles portent la mention suivante : « *Ellipsoïde international - Hayford 1909, Projection UTM - Fuseau 36 [ou 35 suivant les cartes]* ». Ces cartes ont été dressées dans le système Égypte 1933 (voir § 4.5).

3.3. Cartes géologiques

Les cartes, réalisées à l'échelle 1/500 000 par The Egyptian General Petroleum Corporation/CONOCO (voir fig. 20) en 1986-1987, portent la mention « *WGS 72 Spheroid* ». Toutefois à l'échelle où elles ont été réalisées (1/500 000), leur système géodésique peut être assimilé à WGS 84.

Les cartes réalisées à l'échelle 1/250 000 par le Geological Survey of Egypt de 1992 à 1994 portent uniquement la mention « *Transverse Mercator projection* », mais le carroyage est en

147. Spatiocarte de l'oasis de Farafrâh et du désert Blanc de 2003, 1/100 000 (voir fig. 24).

148. Cette série a été complétée dans les années 2000 par des spatiocartes, par exemple, la feuille NH36-E1b « Wadi ar-Rayyan ». Cette dernière, éditée par l'EGSA en 2001, porte les mentions « Egyptian Transverse Mercator (ETM), Zone 2 (29° E - 33° E) » et « Red Belt ».

149. Des plans cadastraux ont été également réalisés pour d'autres nombreuses villes dont Damahour, Tanta, Assiout, El-Minia, Beni Suef, Mahalla el-Kubra, El-Mansoura, Zaqaqiz, Rosette et Port Saïd (MURRAY 1950, p. 28-32 ; ARNAUD 1989, p. 59-63).

150. MARTIN 2002b, p. 171.

151. Un orthophotoplan est un plan dont le fond n'est pas un dessin, mais une ou plusieurs photographies aériennes qui ont été traitées pour éliminer les déformations dues aux reliefs et à la perspective.

longitude et latitude. Étant basées sur des cartes militaires de 1975, elles sont probablement réalisées dans le système European Datum 1950 avec la projection UTM.

3.4. Tableau récapitulatif

Au total, onze systèmes géodésiques ont été recensés sur l'Égypte ; le **tableau 8** en récapitule les principaux paramètres et la cartographie associée¹⁵².

§	Système de référence	Ellipsoïde	Projection(s) associée(s)	Cartographie associée
2.1	Commission d'Égypte 1803 pas de code EPSG	Commission des poids et mesures 1799 pas de code EPSG	Transverse Cylindrique de Cassini	Cartes de la <i>Description de l'Égypte</i>
2.2	Égypte 1907 code EPSG 4229	Helmert 1906 code EPSG 7020	ETM	Production de l'EGSA - cadastre 1/500 et 1/1 000 (1933-1948) - 1/5 000 d'Alexandrie (1991) - 1/5 000 d'Alexandrie (2002-2004) - orthophotoplans 1/10 000 (1995) - série du 1/50 000 (1980-1990) - spatiocartes 1/50 000 (ca 2000) - spatiocarte EGSA/IGN « Greater Cairo » 1/70 000 (2002)
2.3	Adindan Datum code EPSG 4201	Clarke 1880 code EPSG 7012	Non étudiée	Soudan
2.4	Égypte 1933 code EPSG 4199	International 1924 code EPSG 7022	UTM	Plans SFS/IGN 1/5 000 et 1/10 000 (1978)
2.5	Pulkovo 1942 code EPSG 4284	Krassowsky 1940 code EPSG 7024	Gauss-Krüger zones 5 et 6	Cartes russes 1/200 000 et 1/500 000 (1970-1980)
2.6	European Datum 1950 code EPSG 4230	International 1924 code EPSG 7022	UTM	Cartes aéronautiques ONC/TPC 1/500 000 (antérieures à 1990)
			Mercator	Certaines cartes marines du SHOM (antérieures à 1990)
2.7	S.650 TL Network code EPSG 4706	Helmert 1906 code EPSG 7020	<i>Red Belt</i>	Non étudiée
2.8	WGS 72 code EPSG 4985	WGS 72 code EPSG 7043	UTM	Cartes géologiques The Egyptian General Petroleum Corporation/CONOCO, 1/500 000 (1986-1987)
			Mercator	Certaines cartes marines du SHOM
2.9	EGN 80 pas de code EPSG	Helmert 1906 code EPSG 7020	Non étudiée	Pas de cartographie connue
2.10	WGS 84 code EPSG 4979	WGS 84 code EPSG 7030	UTM	Cartes aéronautiques ONC/TPC 1/500 000 (postérieures à 1990)
			Mercator	Certaines cartes marines du SHOM ou du britannique Hydrographic Office
2.11	NED 95 pas de code EPSG	WGS 84 code EPSG 7030	MTM	Carte EGSA/IGN-FI, série « Satellite Tourist Map » 1/100 000 (2003)

Tableau 8 : Tableau récapitulatif des systèmes géodésiques utilisés en Égypte

152. Liste non exhaustive.

4. Les travaux du CEAlex

Dès 1995, le CEAlex a noué un partenariat avec l'École supérieure des géomètres et topographes (ESGT)¹⁵³ en accueillant pendant plusieurs années des élèves-ingénieurs qui ont réalisé, à Alexandrie, leur travail de fin d'études (TFE) dans le but d'obtenir leur diplôme d'ingénieur. Dans un premier temps, les travaux ont porté sur la mise en place d'un SIG sur la ville d'Alexandrie, à partir du cadastre existant publié entre 1933 et 1948, à l'échelle 1/500. C'est ainsi que le cadastre informatisé d'Alexandrie est né, contenant près de 50 000 parcelles vectorisées et couvrant plus de 1 900 hectares¹⁵⁴, le tout géoréférencé dans le système Égypte 1907, projection ETM *Red Belt*. Ensuite, plusieurs TFE se sont orientés sur la pratique du GPS différentiel, dans le but de mettre en place un système de référence spatial compatible avec le cadastre informatisé, pour les relevés topographiques, mais aussi pour les différents travaux de recherche du CEAlex.

4.1. Calcul d'un point de référence

En 1998, le CEAlex a installé un point de référence¹⁵⁵ sur la terrasse du huitième étage de l'immeuble¹⁵⁶ qu'il occupe, à Alexandrie. Ce point de référence, appelé « st-cea », a été observé par GPS différentiel bi-fréquence¹⁵⁷ pendant deux sessions de 24 h. Les observations ont été calculées¹⁵⁸ par post-traitement à partir de deux stations permanentes du réseau de l'International GPS Service for Geodynamics (IGS)¹⁵⁹, Matera (Italie) et Ankara (Turquie). Les coordonnées du point de référence sont connues dans le système ITRS¹⁶⁰, avec une précision quasi-centimétrique. Cette première étape a été d'une importance capitale, car les relevés topographiques ultérieurs ont pu être rattachés relativement à ce point, par GPS différentiel.

4.2. Transformation des coordonnées GPS

Dans le but d'intégrer les relevés topographiques dans le SIG, une transformation d'Helmert a été calculée en 1999¹⁶¹ pour passer des coordonnées ITRF (que nous assimilerons au système WGS 84) au système kilométrique égyptien utilisé à Alexandrie (Égypte 1907, ETM *Red Belt*). En effet, en l'absence de paramètres officiels et de repères géodésiques fiables (les points géodésiques implantés dans les années 1920 avaient presque tous disparu), le CEAlex a dû calculer sa propre transformation, applicable au territoire alexandrin. Pour cela, il fallait connaître des points dans les deux systèmes de coordonnées : celui du GPS, mesuré sur le terrain et rattaché à la station « st-cea » et celui du système égyptien, mesuré graphiquement sur les planches cadastrales. Au total, 17 points répartis dans la ville, ont permis de calculer la

153. École d'ingénieur rattachée au Conservatoire national des arts et métiers située à Evry, puis au Mans à partir de 1997, <http://www.esgt.cnam.fr>.

154. ARNAUD 2002, p. 165.

155. BOFFY 1998, p. 17-20.

156. 50 rue Soliman Yousri, 21131 Alexandrie.

157. Leica système 300, mis à disposition par la société Leica Geosystems France, dans le cadre d'un partenariat.

158. Par Françoise Duquenne.

159. Renommé depuis International GNSS Service. Ce réseau comptait en 1998 moins d'une quarantaine de stations permanentes à travers le monde. Il en compte aujourd'hui plus de 400.

160. ITRF93 époque 1998.1.

161. MEULIEN 1999, p. 15-31.

transformation CEALex 1999 (**tableau 9**) avec le logiciel SKI¹⁶²; elle sert depuis à rattacher l'ensemble des relevés topographiques¹⁶³.

Système de départ	Égypte 1907				
Système d'arrivée	ITRF, assimilé à WGS 84				
Paramètres de la transformation CEALex 1999	d_x (m)	d_y (m)	d_z (m)	r_z (")	D (ppm)
	-223,505	196,430	-31,601	-4,532 762	7,719 541

Tableau 9 : Paramètres de la transformation CEALex 1999

Par ailleurs, le CEALex a calculé une autre transformation incluant un modèle du géoïde sur la région d'Alexandrie, permettant le rattachement altimétrique par GPS, que nous n'aborderons pas en détail ici¹⁶⁴.

4.3. Mise en place d'une station GPS permanente

En 2001, une station GPS permanente¹⁶⁵, nommée « ALEX » a été installée sur la terrasse du CEALex, à proximité du point initial « st-cea », afin d'enregistrer les signaux satellitaires 24h sur 24. Cette station permanente¹⁶⁶ a été la première à être mise en place en Égypte¹⁶⁷ et à fournir les données gratuitement et de façon pérenne, en particulier à l'attention de la communauté des archéologues travaillant dans le pays¹⁶⁸. Les données d'observations, au format *Recevoir Indépendant Exchange* (RINEX)¹⁶⁹ compressé, sont disponibles par téléchargement sur le site internet www.station-gps.cea.com.eg, sous trois échantillonnages différents¹⁷⁰, pour la période de décembre 2001 à mars 2008.

En 2008, le matériel GPS¹⁷¹ a été renouvelé afin de pouvoir enregistrer les données *Global Navigation Satellite System* (GNSS)¹⁷², ce qui a donné lieu à une nouvelle station GPS permanente nommée « ALX2 »¹⁷³. Dorénavant, l'utilisateur peut, après inscription sur le site www.station-gpsspiderweb.cea.com.eg, demander le produit souhaité (période, échantillonnage et observations GPS et/ou GLONASS).

162. SKI Software for Microsoft, version 1.09 de Leica. La transformation ayant été calculée initialement dans le sens ITRF vers Égypte 1907 (MEULIEN 1999, annexe B.3), tous les signes des paramètres ont été inversés, excepté pour r_z , afin de respecter la convention IERS (voir tableau 1).

163. MARTIN 2003.

164. MEULIEN 1999, p. 32-50 ; MARTIN 2003, p. 21-22.

165. AKOUM 2001.

166. Récepteur Leica système 500, Antenne AT501, logiciel ControlStation.

167. À ce jour, nous n'avons pas connaissance de l'existence d'autres stations GPS permanentes et gratuites en Égypte.

168. MARTIN 2002a.

169. Format d'échange standard exploitable par la majorité des logiciels de calcul différentiel.

170. Cadence d'enregistrement des données d'observations GPS : toutes les 1, 15 ou 30 secondes.

171. Récepteur Leica système GRX 1200 GG, Antenne AT504 GG, logiciel GPS Spider.

172. Système de localisation et de navigation, associant plusieurs systèmes à couverture mondiale, notamment le système GPS (américain), le système GLONASS (russe), ou encore le futur système Galileo (européen), entre autres.

173. LEROY 2008.

4.4. Comparaison des transformations entre les systèmes Égypte 1907 et WGS 84

Pour convertir des coordonnées entre les systèmes Égypte 1907 et WGS 84, nous avons recensé six transformations principales (voir tableau 2). Afin d'apprécier leur précision, les courbes des écarts en distance horizontale (isolignes) liés au choix de la transformation ont été reportées sur la carte d'Égypte, pour les quatre meilleures transformations étudiées : DMA 1987 (code EPSG 1148), CEALex 1999, Mina 2006 (code EPSG 7697) et Shaker 2007-7. Les points utilisés pour ces calculs sont les 13 points mesurés par Doppler par la DMA en 1977 et 1978¹⁷⁴ et la station GPS permanente « ALEX » (fig. 25).

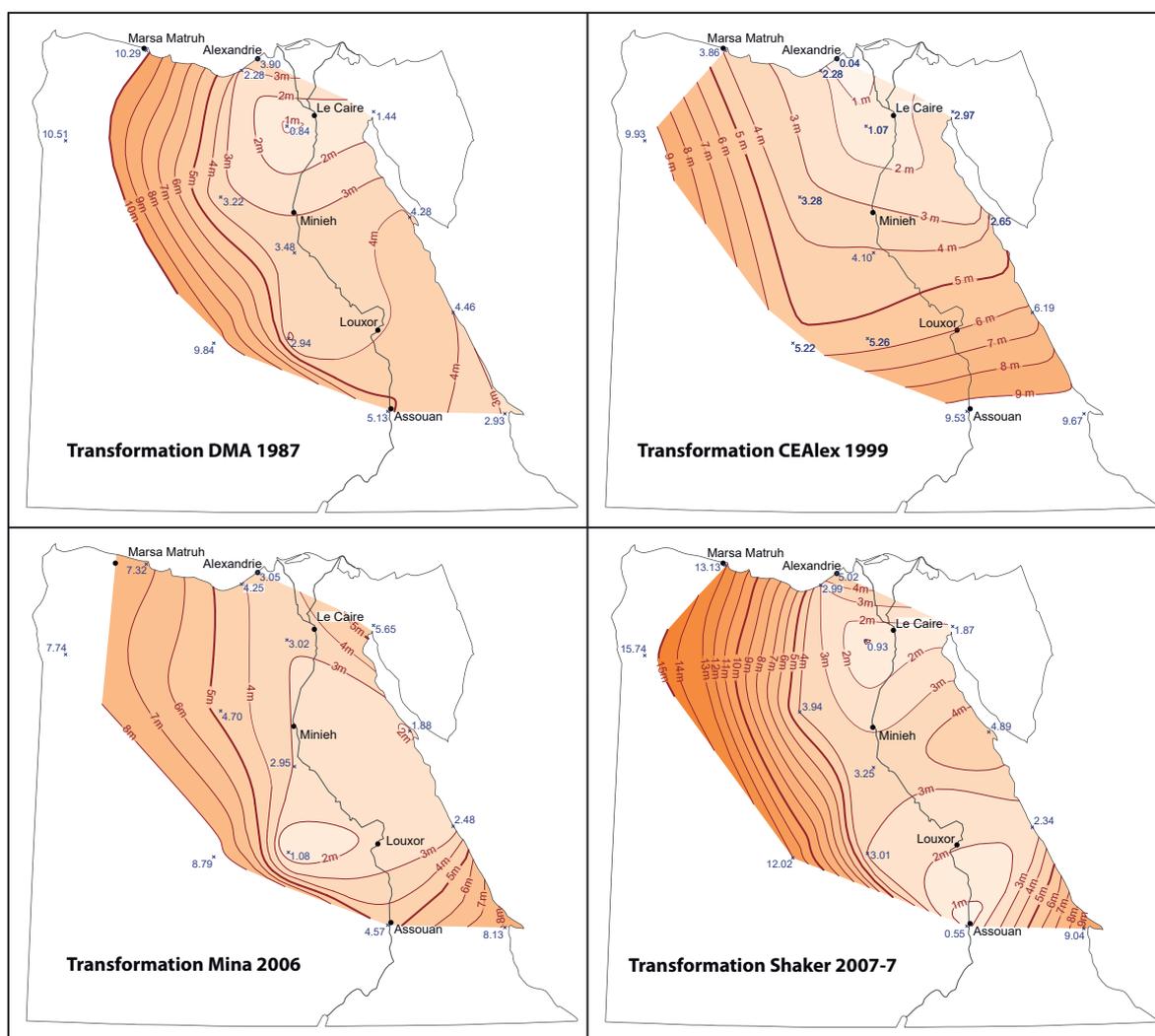


Figure 25 : Cartes indiquant les écarts calculés pour les transformations DMA 1987, CEALex 1999, Mina 2006 et Shaker 2007-7. © Dessin P. Brial, C. Shaalan

174. DMA 1978.

La transformation DMA 1987, bien qu'étant la plus simple, donne de bons résultats dans un rayon de 150 km autour du Caire. Elle pourra donc être utilisée en toute confiance avec les matériels qui ne prennent en compte que les paramètres de translation, comme les GPS de navigation. Cette transformation y est en général déjà disponible en sélectionnant le *datum* pré-enregistré appelé *Old Egyptian* (dans le matériel de la marque Garmin) ou *EGYPT* (dans le matériel de la marque Magellan). La transformation CEAlex 1999 est logiquement supérieure à toutes les autres sur Alexandrie. Il s'avère qu'elle est d'une précision équivalente aux autres transformations sur une bonne partie du quart nord-est du territoire. Nous proposons ainsi d'utiliser :

- CEAlex 1999 sur la zone s'étendant de la mer Méditerranée au nord jusqu'à Minieh au sud, ainsi que dans le désert Libyque jusqu'à Marsa Matrouh, à l'ouest ;
- Mina 2006 entre Minieh et Louxor inclus, ainsi que dans le désert Libyque ;
- Shaker 2007-7 au sud de Louxor.

4.5. Détermination du système géodésique des plans SFS/IGN

La série de plans établie par le consortium SFS/IGN aux échelles 1/5 000 et 1/10 000 en 1978 sur Alexandrie est la seule, à une échelle aussi détaillée, faisant figurer des courbes de niveaux. Ces documents présentaient donc un intérêt certain pour les archéologues d'Alexandrie. Malheureusement, les coordonnées planimétriques relevées sur ces plans ne concordaient pas avec celles utilisées par le Centre d'Études Alexandrines, rattachées au système Égypte 1907. Il fallait donc déterminer dans quel système géodésique ces plans avaient été établis, puis calculer des paramètres de conversion entre les deux systèmes.

529

La légende des plans SFS/IGN (voir fig. 18) n'indique pas le système géodésique utilisé, mais mentionne l'ellipsoïde « international - Hayford 1909 », appelé officiellement International 1924¹⁷⁵, et la projection « UTM - Fuseau 36 ». Ces informations conduisirent tout naturellement, dans un premier temps, à émettre l'hypothèse d'un rattachement à Europe 1950. L'ellipsoïde, la projection, la date, concordaient. Mais des essais de calcul effectués sur les coordonnées de la colonne Pompée montraient des écarts de 70 mètres.

Nous connaissons, par la base de données de l'EPSG, l'existence du système Égypte 1933¹⁷⁶, qui utilise le même ellipsoïde (International 1924). L'EPSG ne mentionne toutefois pas de paramètres permettant d'effectuer des conversions à partir de ce système. Nous savions qu'Égypte 1933 utilise le même point fondamental (station F1, Moqattam) qu'Égypte 1907, avec une longitude corrigée de +3,45" et un ellipsoïde différent (International 1924 au lieu d'Helmert 1906). Si l'on ne tient pas compte de la correction de longitude dans un premier temps, le point fondamental a les mêmes coordonnées géographiques dans les deux systèmes, mais comme les ellipsoïdes sont différents, les centres des ellipsoïdes ne sont pas aux mêmes endroits. Nous devons donc calculer le décalage entre les deux centres. En calculant les coordonnées cartésiennes géocentriques du point fondamental station F1, nous avons obtenu les paramètres de transformation présentés dans le **tableau 10**.

175. EPSG 2016, *Ellipsoids*, code 7022.

176. EPSG 2016, *Geographic CRS*, code 4199. L'EPSG désigne ce système sous les noms d'Egypt 1930 et New Egyptian.

Point	Station F1 (Moqattam) coordonnées géographiques $\lambda = 31,276^\circ \text{ E}$; $\varphi = 30,028\ 572\ 22^\circ \text{ N}$		
Ellipsoïde de départ	Helmert 1906		
Ellipsoïde d'arrivée	International 1924		
Paramètres de transformation	d_x (m)	d_y (m)	d_z (m)
	156,558	95,099	11,733

Tableau 10 : Décalage entre les centres des ellipsoïdes Helmert 1906 et International 1924

Restait à appliquer le décalage dû à l'erreur de $-3,45''$ sur la mesure de la longitude de la station F1. La correction correspond à une rotation de l'ellipsoïde sur l'axe des Z. Nous avons donc complété les paramètres ci-dessus d'une rotation $r_z = 3,45''$, valeur du décalage en longitude, pour obtenir les paramètres complets de la transformation du système Égypte 1907 vers Égypte 1933 (tableau 11).

Système de départ	Égypte 1907			
Système d'arrivée	Égypte 1933			
Paramètres de transformation	d_x (m)	d_y (m)	d_z (m)	r_z (")
	156,558	95,099	11,733	3,45

Tableau 11 : Paramètres de transformation entre les systèmes Égypte 1907 et Égypte 1933

Nous avons appliqué ces paramètres sur un jeu d'une vingtaine de points relevés sur les plans SFS/IGN et sur des plans réalisés dans le système Égypte 1907, projection ETM *Red Belt* et avons obtenu une précision moyenne de 4 mètres, correspondant à 0,8 mm à l'échelle 1/5 000, ce qui est cohérent avec la précision graphique des plans. Ce résultat a ainsi confirmé, de notre point de vue, l'utilisation du système géodésique Égypte 1933 pour l'établissement des plans SFS/IGN¹⁷⁷.

4.6. Proposition d'un protocole de travail

L'usage de plus en plus répandu du GPS sur les chantiers archéologiques incitera naturellement à utiliser le nouveau système égyptien NED 1995. Les archéologues doivent fréquemment s'appuyer sur un fond cartographique existant, mais les cartes topographiques et cadastrales disponibles auprès de l'EGSA sont quasiment toutes dans le système Égypte 1907. La série à l'échelle 1/50 000, dont certaines cartes ont été produites après la création du système NED 1995, est encore dans l'ancien système Égypte 1907, de même que la série de cartes établies à l'échelle 1/5 000 dans les années 2000, entre autres sur la région d'Alexandrie¹⁷⁸. Le choix d'un système géodésique se limitera donc à Égypte 1907 ou NED 1995 et dépendra d'une part du contexte cartographique, et d'autre part de la disponibilité de points géodésiques dans les environs immédiats du chantier.

177. Le principe du raisonnement a été approuvé par Th. Gattacceca, service de Géodésie et Nivellement de l'IGN en janvier 2004.

178. EGSA 2014, p. 66.

Pour les chantiers isolés, ne pouvant pas être rattachés à une station de référence, nous préconisons l'implantation d'un point de référence qui sera rattaché par GPS différentiel en WGS 84 soit par un post-traitement avec une station permanente, soit isolément par moyenne de mesures pendant une durée d'observation d'au moins quatre heures. Les travaux topographiques pourront être ensuite réalisés à partir de ce point dans le système NED 1995, avec la projection MTM.

Pour les chantiers s'appuyant sur un fond cartographique dans le système Égypte 1907, l'idéal est bien entendu de partir de points ou bornes géodésiques existants, rattachés dans ce système. Le problème du choix des paramètres de transformation à utiliser va alors se poser. Si plusieurs points géodésiques sont disponibles, il sera prudent de tous les relever au GPS, en WGS 84 et de calculer une transformation locale. Malheureusement, les points géodésiques sont rares en Égypte.

Dans le cas où il est nécessaire de travailler dans le système Égypte 1907, mais où aucune borne géodésique n'est disponible, il conviendra dans un premier temps d'établir un point de référence dont les coordonnées WGS 84 seront obtenues le plus précisément possible (post-traitement depuis une station permanente ou point isolé observé pendant au moins 4 heures). Si le fond cartographique consiste en des cartes d'une échelle inférieure ou égale au 1/25 000, les transformations CEAlex 1999 ou DMA 1987 seront d'une précision suffisante. Sinon pour les plus grandes échelles, il sera nécessaire de calculer une transformation locale en s'appuyant sur des points digitalisés sur les plans existants. C'est cette dernière solution qui a été retenue par le CEAlex pour ses chantiers d'Alexandrie et qui a entraîné la création de la transformation CEAlex 1999. La méthodologie utilisée par le CEAlex pour déterminer des paramètres locaux, indiquée au § 4.2, pourra servir d'exemple dans des situations similaires.

Quelles que soient les méthodes de rattachement et les transformations retenues, celles-ci devront être soigneusement documentées sur les plans produits.

Tableaux de synthèse

Ellipsoïdes

Nom ellipsoïde dans l'article	§	Code EPSG ellipsoïde ¹⁷⁹	Nom ellipsoïde EPSG	Alias ellipsoïde EPSG	Demi-grand axe a (m)	Aplatissement f	da (m)	df × 10 ⁴
Clarke 1880	2.3	7012	Clarke 1880 (RGS)	Clarke Modified 1880	6 378 249,145	1/293,465	-112,145	-0,547 507 140
Commission des poids et mesures 1799	2.1	—	—	—	6 375 738,7	1/334,29	2 398,3	3,613 960 248
Helmert 1906	2.2 et 2.9	7020	Helmert 1906	—	6 378 200	1/298,3	-63	0,004 807 955
International 1924	2.4 et 2.6	7022	International 1924	Hayford 1909	6 378 388	1/297	-251	0,141 927 023
Krassowsky 1940	2.5	7024	Krassowsky 1940	—	6 378 245	1/298,3	-108	0,004 807 955
WGS 72	2.8	7043	WGS 72	NWL 10D	6 378 135	1/298,26	2	0,000 312 106
WGS 84	2.10	7030	WGS 84	—	6 378 137	1/298,257 223 563	—	—

179. EPSG 2016, *Ellipsoids*.

Systèmes de référence de coordonnées géographiques

Nom système géodésique dans l'article	§	Code EPSG système géodésique ¹⁸⁰	Nom système géodésique EPSG	Alias système géodésique EPSG	Ellipsoïde	Code EPSG ellipsoïde ¹⁸¹	Point fondamental	Méridien origine
Adindan Datum	2.3	4201	Adindan	Blue Nile 1958	Clarke 1880 (RGS)	7012	Station 15 Adindan	Greenwich
Commission d'Égypte 1803	2.1	—	—	—	Commission des poids et mesures 1799	—	Terrasse de l'Institut d'Égypte au Caire	Paris
Égypte 1907	2.2	4229	Egypt 1907	Old Egyptian	Helmert 1906	7020	Station F1 (Moqattam)	Greenwich
Égypte 1933	2.4	4199	Egypt 1930	New Egyptian	International 1924	7022	Station F1 corrigée (Moqattam)	Greenwich
EGN 80	2.9	—	—	—	Helmert 1906	7020	Station O1 (Helwan)	Greenwich
European Datum 1950	2.6	4230	ED50	European Datum 1950	International 1924	7022	Tour Helmert à Potsdam (Allemagne)	Greenwich
NED 1995	2.11	—	—	—	WGS 84	7030	Ellipsoïde géocentré	Greenwich
Pulkovo 1942	2.5	4284	Pulkovo 1942	S-42	Krassowsky 1940	7024	Observatoire de Pulkovo (Russie)	Greenwich
S.650 T.L. Network	2.7	4706	Egypt Gulf of Suez S-650 TL	S-650 TL	Helmert 1906	7020	Station S-650 DMX	Greenwich
WGS 72	2.8	4985	WGS 72	World Geodetic System 1972	WGS 72	7043	Ellipsoïde géocentré	Greenwich
WGS 84	2.10	4979	WGS 84	World Geodetic System 1984	WGS 84	7030	Ellipsoïde géocentré	Greenwich

180. EPSG 2016, *Geographic CRS.*181. EPSG 2016, *Ellipsoids.*

Systèmes de référence de coordonnées projetées

Nom projection dans l'article	Code EPSG projection ¹⁸²	Nom projection EPSG	Nom système géodésique	Code EPSG système ¹⁸³	Type
ED 50 / UTM 35 N	23035	ED50 / UTM zone 35N	European Datum 1950	4230	Mercator Transverse
ED 50 / UTM 36 N	23036	ED50 / UTM zone 36N	European Datum 1950	4230	Mercator Transverse
Égypte 1907 / ETM <i>Green Belt</i>	22991	EGYPT 1907 / <i>Blue Belt</i> <i>Alias : EGYPT 1907 / Green Belt</i>	Égypte 1907	4229	Mercator Transverse
Égypte 1907 / ETM <i>Purple Belt Nord</i>	22993	EGYPT 1907 / <i>Purple Belt</i>	Égypte 1907	4229	Mercator Transverse
Égypte 1907 / ETM <i>Purple Belt Sud</i>	22994	EGYPT 1907 / <i>Extended Purple Belt</i> <i>Alias : EGYPT 1907 / Ext. Purple</i>	Égypte 1907	4229	Mercator Transverse
Égypte 1907 / ETM <i>Red Belt Nord</i>	22992	EGYPT 1907 / <i>Red Belt</i>	Égypte 1907	4229	Mercator Transverse
Égypte 1907 / ETM <i>Red Belt Sud</i>	—	—	Égypte 1907	4229	Mercator Transverse
Égypte 1933 / UTM 35 N	—	—	Égypte 1933	4199	Mercator Transverse
Égypte 1933 / UTM 36 N	—	—	Égypte 1933	4199	Mercator Transverse
NED 1995 / MTM zone 1	—	—	NED 1995	—	Mercator Transverse
NED 1995 / MTM zone 2	—	—	NED 1995	—	Mercator Transverse

182. EPSG 2016, *Projected CRS*.183. EPSG 2016, *Geographic CRS*.

Nom projection dans l'article	Code EPSG projection	Nom projection EPSG	Nom système géodésique	Code EPSG système	Type
NED 1995 / MTM zone 3	—	—	NED 1995	—	Mercator Transverse
NED 1995 / MTM zone 4	—	—	NED 1995	—	Mercator Transverse
NED 1995 / MTM zone 5	—	—	NED 1995	—	Mercator Transverse
PULKOVO 1942 / Gauss-Krüger zone 5	28405	PULKOVO 1942 / Gauss-Krüger zone 5 Alias : PULKOVO 1942 / 6-degree Gauss-Krüger zone 5 PULKOVO 1942 / GK zone 5 S-42 zone 5	Pulkovo 1942	4284	Mercator Transverse
PULKOVO 1942 / Gauss-Krüger zone 6	28406	PULKOVO 1942 / Gauss-Krüger zone 6 Alias : PULKOVO 1942 / 6-degree Gauss-Krüger zone 6 PULKOVO 1942 / GK zone 6 S-42 zone 6	Pulkovo 1942	4284	Mercator Transverse
S.650 T.L. Network / Red Belt	3355	Egypt Gulf of Suez S-650 TL / Red Belt Alias : S-650 TL / Red Belt	S.650 T.L. Network	4706	Mercator Transverse
WGS 72 / UTM 35 N	32235	WGS 72 / UTM zone 35N	WGS 72	4985	Mercator Transverse
WGS 72 / UTM 36 N	32236	WGS 72 / UTM zone 36N	WGS 72	4985	Mercator Transverse
WGS 84 / UTM 35 N	32635	WGS 84 / UTM zone 35N	WGS 84	4979	Mercator Transverse
WGS 84 / UTM 36 N	32636	WGS 84 / UTM zone 36N	WGS 84	4979	Mercator Transverse
WGS 84 / UTM 37N	32637	WGS 84 / UTM zone 37N	WGS 84	4979	Mercator Transverse

Transformations entre systèmes géodésiques

Système de départ	Système d'arrivée	Nom transformation dans l'article	Code / nom EPSG transformation ¹⁸⁴	d _x (m)	d _y (m)	d _z (m)	r _x (")	r _y (")	r _z (")	D (ppm)
EGN 80	WGS 72	El Hosseney	—	-66,69	17,64	-21,63	—	—	—	—
EGN 80	WGS 84	EGN 80	—	-66,69	17,64	-17,13	—	—	0,554	0,219 8
Égypte 1907	WGS 72	—	1545 Egypt 1907 to WGS 72 (1)	-121,8	98,1	-15,2	—	—	—	—
Égypte 1907	WGS 84	EPSG 8537	8537 Egypt 1907 to WGS 84 (2)	-121,8	98,1	-10,7	—	—	0,554	0,226 3
Égypte 1907	WGS 84	CEAlex 1999	—	-223,505	196,430	-31,601	—	—	-4,532 762	7,719 541
Égypte 1907	WGS 84	DMA 1983	—	-120	98	-11,5	—	—	0,554	0,219 8
Égypte 1907	WGS 84	DMA 1987	1148 Egypt 1907 to WGS 84 (1) Version : DMA-Egy	-130	110	-13	—	—	—	—
Égypte 1907	WGS 84	Mina 2006	7697 Egypt 1907 to WGS 84 (4) Version : SRI-Egy	-127,535	113,495	-12,7	1,603 747	-0,153 612	-5,364 408	5,337 450
Égypte 1907	WGS 84	Shaker 2007-7	—	88,832	-186,714	-151,82	Y _p (m) = 2 945 552,013	Z _p (m) = 2 868 447,61	11,276	6,413

184. EPSG 2016, *Coordinate Transformation*.

Système de départ	Système d'arrivée	Nom transformation dans l'article	Code / nom EPSG transformation	d_x (m)	d_y (m)	d_z (m)	r_x (")	r_y (")	r_z (")	D (ppm)
Égypte 1933	Égypte 1907	—	—	-156,558	-95,099	-11,733	—	—	-3,45	—
Égypte 1933	WGS 84	Égypte 1933 (DMA 1987)	—	-286,558	14,901	-24,733	—	—	-3,45	—
European Datum 1950	WGS 84	ED 50	1810 ED50 to WGS 84 (31) Version : Wgc72-Egy	-84	-103	-122,5	—	—	0,554	0,226 3
European Datum 1950	WGS 84	ED 50 (EUR-F)	1137 ED50 to WGS 84 (5) Version : EUR-F	-130	-117	-151	—	—	—	—
European Datum 1950	WGS 84	ED 50 (EUR-M)	1133 ED50 to WGS 84 (1) Version : EUR-M	-87	-98	-121	—	—	—	—
Pulkovo 1942	WGS 84	Pulkovo 1942	1254 Pulkovo 1942 to WGS 84 (1) Version : DMA-Rus	28	-130	-95	—	—	—	—
S.650 TL Network	WGS 72BE	—	15792 Egypt Gulf of Suez S-650 TL to WGS 72BE (1) Version : ESL-Egy GoS	-123	98	2	—	—	—	—
S.650 TL Network	WGS 84	—	8657 Egypt Gulf of Suez S-650 TL to WGS 84 (1) Version : OGP-Egy GoS	-123	98	3,9	—	—	0,814	-0,38
S.650 TL Network	WGS 84	—	15846 Egypt Gulf of Suez S-650 TL to WGS 84 (2) Version : S-650 TL to WGS 84 (2)	-146,21	112,63	4,05	—	—	—	—

Système de départ	Système d'arrivée	Nom transformation dans l'article	Code / nom EPSG transformation	d _x (m)	d _y (m)	d _z (m)	r _x (")	r _y (")	r _z (")	D (ppm)
S.650 TL Network	WGS 84	S.650 TL Network	—	-123,8	98,2	3,9	-0,047	0,019	0,808	-0,387 26
WGS 72	WGS 84	WGS 72	1237 WGS 72 to WGS 84 (1) Version : DMA1	—	—	4,5	—	—	0,554	0,226 3
WGS 72	WGS 84	WGS 72	1238 WGS 72 to WGS 84 (2) Version : DMA2	—	—	4,5	—	—	0,554	0,219
WGS 72BE	WGS 72	—	1239 WGS 72BE to WGS 72 (1) Version : DMA	—	—	-2,6	—	—	0,26	-0,606 3
WGS 72BE	WGS 84	—	1240 WGS 72BE to WGS 84 (1) Version : DMA	—	—	1,9	—	—	0,814	-0,38

Liste des sigles

- AIG** : Association internationale de géodésie / International Association of Geodesy (IAG).
- AMS** : Army Map Service. Service géographique de l'armée des États-Unis de 1941 à 1968, intégré en 1972 dans la Defense Mapping Agency (DMA), voir DMA.
- ASPRS** : American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- CEA****Alex** : Centre d'Études Alexandrines, Unité de service et de recherche 3134 Cnrs/Ifao.
- DMA** : Defense Mapping Agency. Service géographique de l'armée des États-Unis créé en 1972, intégré en 1996 dans la National Imagery and Mapping Agency (NIMA), puis en 2003 dans la National Geospatial-Intelligence Agency (NGA), voir NIMA et NGA.
- DoD** : Department of Defense. Ministère de la Défense des États-Unis.
- ED 50** : European Datum 1950. Système géodésique européen unifié, créé dans les années 1950.
- EGSA** : Egyptian General Survey Authority. Institution en charge de la production cartographique de l'Égypte, voir ESA.
- EPSG** : European Petroleum Survey Group. Groupe créé en 1985, qui a intégré depuis 2005 l'International Association of Oil & Gas Producers (IOGP), voir IOGP. Ce groupe a créé une base de données mondiale sur les systèmes géodésiques et les projections cartographiques, dont elle a conservé le nom : l'EPSG *Geodetic Parameter Registry*.
- ESA** : Egyptian Survey Authority. Institution en charge de la production cartographique de l'Égypte, qui s'appelle désormais Egyptian General Survey Authority (EGSA), voir EGSA.
- ESGT** : École supérieure des géomètres et topographes.
- ETM** : *Egyptian Transverse Mercator*. Projection Mercator Transverse utilisée en Égypte par l'EGSA.
- GLONASS** : *GLObal NAVigation Satellite System*. Système russe de positionnement à l'échelle du globe, d'origine soviétique, et géré par la Russie.
- GNSS** : *Global Navigation Satellite System*. Système de navigation mondial par satellite, comprenant l'ensemble des systèmes GPS, GLONASS, Galileo...
- GPS** : *Global Positioning System*. Système de positionnement à l'échelle du globe, mis en place par les États-Unis.
- HARN** : *High Accuracy Reference Network*. Réseau de référence de haute précision mesuré par GPS.
- IERS** : International Earth Rotation Service. Service international de la rotation terrestre chargé de maintenir les systèmes de référence terrestre et céleste.
- Ifao** : Institut français d'archéologie orientale.
- IGN** : Institut géographique national, puis depuis le 1^{er} janvier 2012 Institut national de l'information géographique et forestière.
- IGN-FI** : IGN France international. Société créée en 1996, opérateur technique de l'IGN pour ses projets à l'international, voir IGN.
- IGS** : International GNSS Service; ancienne appellation : International GPS Service for Geodynamics. Service international de l'Association Internationale de Géodésie chargé de favoriser les utilisateurs scientifiques des systèmes GNSS en fournissant des produits haute précision tels que les éphémérides précises et les paramètres de la rotation terrestre.
- IOGP** : International Association of Oil & Gas Producers; ancienne appellation : EPSG, voir EPSG.
- ITRF** : *International Terrestrial Reference Frame*. Réalisation du système de référence terrestre de l'IERS. Depuis 1987, l'IERS publie des réalisations annuelles, ITRF 98, ITRF 2008, etc.

ITRS : *International Terrestrial Reference System*. Système de référence terrestre de l'IERS.

MTM : *Modified Transverse Mercator*; autre appellation : **METM** : *Modified Egyptian Transverse Mercator*.

Projection Mercator transverse modifiée publiée par l'EGSA en 1995.

NED 95 : *New Egyptian Datum 1995*. Nouveau référentiel géodésique égyptien publié par l'EGSA en 1995.

NGA : National Geospatial-Intelligence Agency. Agence du ministère de la Défense des États-Unis, qui a pour but de collecter, analyser et diffuser le renseignement géospatial, notamment en utilisant des images satellites. Elle a remplacé la NIMA en 2003, voir NIMA.

NIMA : National Imagery and Mapping Agency. Service géographique de l'armée des États-Unis, qui s'appelle désormais National Geospatial-Intelligence Agency (NGA), voir NGA.

OGC : Open Geospatial Consortium. Consortium international pour le développement des standards ouverts et d'interopérabilité des données dans le domaine de la géomatique.

ONC : *Operational Navigation Charts*.

RINEX : *Receveir INdependent Exchange*. Format d'échange standard exploitable par la majorité des logiciels de calcul de GPS différentiel.

SFS : Société française de stéréotopographie.

SHOM : Service hydrographique et océanographique de la marine.

SIG : Système d'information géographique.

TFE : Travail de fin d'études. Projet professionnel que les étudiants réalisent en entreprise à la fin de leur cursus d'ingénieur.

TPC : *Tactical Pilotage Charts*.

UTM : *Universal Transverse Mercator*. Projection Mercator transverse universelle.

WGS : *World Geodetic System*. Système de référence géodésique mondial produit par les États-Unis et utilisé par le système GPS, voir GPS.

WGS 66 : *World Geodetic System 1966*. Système de référence géodésique mondial, année 1966.

WGS 72 : *World Geodetic System 1972*. Système de référence géodésique mondial, année 1972.

WGS 84 : *World Geodetic System 1984*. Système de référence géodésique mondial, année 1984.

Bibliographie

AKOUM 2001

H. AKOUM, *Installation d'une station GPS permanente au Centre d'Études Alexandrines*, Mémoire de l'École supérieure des géomètres et topographes, Le Mans, dactylographié, 2001.

AMS 1944

ARMY MAP SERVICE, *Transverse Mercator projection tables*, War Department, Corps of Engineers, U. S. Lake Survey, New York Office, Military Grid Unit, New York, 1944, fiches « Egypt Red Belt », « Egypt Purple Belt ».

AMS 1950

ARMY MAP SERVICE, *Grids and grid references*, Corps of Engineers, Department of the Army, Washington, 1950, fiches « Egypt Red Belt », « Egypt Purple Belt ».

ANONYME s. d.

ANONYME, *The three belt system of Egypt*, s. d., s. l. (archives Ifao).

ARNAUD 1989

J.-L. ARNAUD, *Cartographie de l'Égypte*, Observatoire Urbain du Caire Contemporain, supplément à la lettre 16, CEDEJ, Le Caire, 1989.

ARNAUD 2002

J.-L. ARNAUD, « Un outil cartographique : le cadastre informatisé d'Alexandrie », in J.-Y. EMPEREUR (éd.), *Alexandrina 2, ÉtAlex 6*, Le Caire, 2002, p. 159-175.

AUJAC 2001

G. AUJAC, *Ératosthène de Cyrène, le pionnier de la géographie*, Paris, 2001.

AWWAD 2016

T.M. AWWAD, « Relationship of ETM and UTM projection scale factors in Egypt », *International Journal of Civil Engineering (IJCE)* 5.6, Oct.-Nov. 2016, p. 57-68, en ligne : http://www.academia.edu/30213802/RELATIONSHIP_OF_ETM_AND_UTM_PROJECTION_SCALE_FACTORS_IN_EGYPT (consulté le 26/05/2017).

BOFFY 1998

P. BOFFY, *Intégration des cartes anciennes au SIG alexandrin, Implantation d'un système de référence cartographique*,

Développement d'un logiciel de traitement des cartes anciennes, Mémoire de l'École supérieure des géomètres et topographes, Le Mans, dactylographié, 1998.

BOUCHER 1979

Cl. BOUCHER, *Le système World Geodetic System 1972 (WGS 1972)*, Institut Géographique National, Service de Géodésie, Nivellement et Métrologie, Département études et calculs, IGN NT/G n° 15, Saint-Mandé, 1979.

BOUCHER 1987

Cl. BOUCHER, *Nouveaux systèmes géodésiques utilisables en France (WGS84, ED87)*, IGN RT/G n° 14, Saint-Mandé, 1987.

BROWNE 1881

C.O. BROWNE, « Observations at Mokattam, near Cairo », *Account of observations of the transit of Venus, 1874, December 8, made under the authority of the British government: and of the reduction of the observations*, s. l., 1881, p. 259-317, en ligne : https://ia601407.us.archive.org/0/items/account_of_observation_of_venus_1874/account_of_observation_of_venus_1874.pdf (consulté le 04/04/2017).

COLE 1944

J.H. COLE, *Geodesy in Egypt*, Ministry of Finance, Survey Department, Bûlâq, Le Caire, 1944.

DMA 1978

DEFENSE MAPPING AGENCY, *Egypt: summary of satellite-observed stations*, s. l., 1978 (archives NIMA).

DMA 1983a

DEFENSE MAPPING AGENCY, *Transformation parameters (Translations only) for geodetic datum to WGS 1972*, Washington, 1983 (archives IGN).

DMA 1983b

DEFENSE MAPPING AGENCY, *Geodesy for the layman*, TR 80-003, Washington, 1983, en ligne : <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a142764.pdf> (consulté le 04/04/2017).

DMA 1987

DEFENSE MAPPING AGENCY, *Datums, ellipsoids, grids, and grid reference systems*, TM 8358.1, Preliminary edition, Washington, 1987 (archives IGN).

DMA 1990

DEFENSE MAPPING AGENCY, *Datums, ellipsoids, grids, and grid reference systems*, TM 8358.1, Edition 1, Washington, 1990, en ligne : http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tm8358.1/pdf/TM8358_1.pdf (consulté le 05/01/2018).

DUQUENNE et al. 2005

FR. DUQUENNE et al., *GPS, localisation et navigation par satellites*, Paris, 2005.

EGSA 1995

EGSA, *Introducing the New Egyptian Datum - 1995*, Final Seminar Schedule, Le Caire, 1995.

EGSA 2004

EGSA, *L'histoire de la topographie en Égypte*, Le Caire, 2004 (en arabe), en ligne : http://www.esa.gov.eg/English/about_us.aspx (consulté le 28/10/2010).

EGSA 2014

EGSA, *Topographic Map Index*, Le Caire, 2014 (en arabe), en ligne : http://www.esa.gov.eg/files/Topographic_Maps.pdf (consulté le 04/04/2017).

EGYPTIAN SURVEYS LIMITED s. d.

EGYPTIAN SURVEYS LIMITED, *Preface to Gulf of Suez Coordinates List*, s. l., s. d. (archives IGN).

EL HOSSENY 1981

M.S.M. EL HOSSENY, « The transformation between Doppler coordinate systems and the Geodetic coordinate system in Egypt », in *International Union of Geodesy and Geophysics, Symposium sur la géodésie, (Nairobi, 1981)*, 1981.

EL HOSSENY 1982

M.S.M. EL HOSSENY, *The adjustment of the geodetic network of Egypt*, submitted for the degree of Doctor of philosophy of the University of London, Department of Photogrammetry and Surveying, Londres, 1982.

EL HOSSENY 1990

M.S.M. EL HOSSENY, « Doppler satellite control and its application in the Egyptian geodetic network », *Survey Review* 30.235, 1990, p. 221-228.

EPSG 2016

EPSG, *EPSG Geodetic parameter data set*, v. 9.0 du 15/12/2016, 2016, en ligne : <http://epsg.org/> (consulté le 28/03/2017).

GODLEWSKA 1988

A. GODLEWSKA, *The Napoleonic survey of Egypt: a masterpiece of cartographic compilation and early nineteenth-century fieldwork*, *Cartographica*, 25.1-2, Monograph 38-39, Toronto, 1988.

IERS 1992

IERS, *Technical Note n° 13, IERS Standards (1992)*, Paris, 1992.

IGN 1982

INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL, *Référentiel géodésique*, IGN, service de Géodésie et Nivellement, 1982, fiches « Old Egyptian 1930 », « S.650 T.L. Network », « Egyptian Datum (Helwan) », « Adindan Datum » (archives IGN).

IGN 1995

INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL, *Système de projection cartographique*, IGN, service de Géodésie et Nivellement, 1995, fiches « Egypt Red Belt Nord », « Egypt Red Belt Sud », « Egypt Purple Belt Nord », « Egypt Purple Belt Sud » (archives IGN).

IOPG 2016

IOPG, *Geomatics Guidance Note 7, part 2, Coordinate Conversions & Transformations including Formulas*, report 373-7-2, septembre 2016, en ligne : <https://www.ioipg.org/wp-content/uploads/2019/09/373-07-02.pdf> (consulté le 15/07/2017).

JACOTIN 1824

P. JACOTIN, « Mémoire sur la construction de la carte de l'Égypte », *Description de l'Égypte, État Moderne*, t. 17, Paris, 1824, éd. Panckoucke, p. 437-625, en ligne : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k280140/f442.image> (consulté le 28/03/2017).

LAISSUS 1998

Y. LAISSUS, *L'Égypte, une aventure savante 1798-1801*, Paris, 1998.

LEROY 2008

A. LEROY, *Installation d'une nouvelle station GPS permanente au Centre d'Études Alexandrines*, Mémoire de l'École supérieure des géomètres et topographes, Le Mans, dactylographié, 2008.

LYONS 1908

H.G. LYONS, *The cadastral survey of Egypt, 1892-1907*, Ministry of Finance, Survey Department, National Printing Department, Le Caire, 1908, en ligne : <https://archive.org/details/cu31924029996257> (consulté le 28/03/2017).

MCCARTHY, PETIT 2004

D.D. MCCARTHY, G. PETIT, *IERS Conventions (2003)*, IERS Technical Note n° 32, Frankfort, 2004, en ligne : https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote32/tn32.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (consulté le 28/03/2017).

MARTIN 2002a

N. MARTIN, « A permanent GPS station at Alexandria », *Egyptian Archaeology* 21, 2002, p. 25-26.

MARTIN 2002b

N. MARTIN, « Acquisition informatique du plan cadastral », in ARNAUD 2002, p. 171-173.

MARTIN 2003

N. MARTIN, « Cartographie et topographie, Le référencement des plans de fouilles dans le système égyptien : l'exemple d'Alexandrie », in J.-Y. EMPEREUR, M.-D. NENNA (éd.), *Nécropolis 2, Ét.Alex* 7, Le Caire, 2003, p. 17-31.

MEULIEN 1999

Cl. MEULIEN, *Le GPS au service de l'archéologie*, Mémoire de l'École supérieure des géomètres et topographes, Le Mans, dactylographié, 1999.

MEYER 2002

Th.H. MEYER, « Grid, ground, and globe: distances in the GPS era », *Surveying and Land Information Science* 62.3, 2002, p. 179-202, voir aussi en ligne : https://www.researchgate.net/publication/289101489_Grid_ground_and_globe_Distances_in_the_GPS_era (consulté le 15/01/2018).

MINA 2006

E. MINA, *A unified system of transformation parameters for combining different geodetic networks in Egypt*, *ASPRS Annual Conference (Reno, Nevada, 2006)*, en ligne : <http://www.asprs.org/a/publications/proceedings/reno2006/0099.pdf> (consulté le 28/03/2017).

MUGNIER 2008

Cl.J. MUGNIER, « Grids & Datums, Arab Republic of Egypt », *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, ASPRS, novembre 2008, 2008, p. 1307-1309, en ligne : <http://www.asprs.org/a/resources/grids/11-2008-egypt.pdf> (consulté le 28/03/2017).

MURRAY 1950

G.W. MURRAY, *The Survey of Egypt, 1898-1948*, Ministry of Finance, Survey of Egypt, Survey Department paper n° 50, English edition, 1950.

NIMA 2000

NATIONAL IMAGERY AND MAPPING AGENCY, *World Geodetic System 1984, its definition and relationships with local geodetic systems*, technical report TR 8350.2, 2000, en ligne : <http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tr8350.2/wgs84fin.pdf> (consulté le 28/03/2017).

NOUET 1822

N.-A. NOUET, « Observations astronomiques faites en Égypte », *Description de l'Égypte, État Moderne*, t. II, Paris, 1822, p. 1-35, en ligne : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k280082/f6.image> (consulté le 03/04/2017).

RATCLIFF 2015

J. RATCLIFF, *The Transit of Venus enterprise in Victorian Britain*, Londres, 2015.

SAAD et al. 1998

A.A. SAAD et al., « Development of a new sets of transformation parameters in Egypt for transforming GPS Data into the Egyptian Geodetic Datum », IUG conference, Istanbul, 1998, en ligne : http://www.bu.edu.eg/portal/uploads/Engineering,%20Shoubra/Surveying%20Engineering/829/publications/Abdallah%20Ahmad%20Saad_paper_24.doc (consulté le 09/05/2017).

SHAKER et al. 2007

A.A. SHAKER *et al.*, « Remove-restore technique for improving the datum transformation process », *FIG Working Week*, Hong-Kong, 13-17 mai 2007, 2007, en ligne : https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2007/papers/ts_3b/tso3b_03_saad_etal_1218.pdf, consulté le 09/05/2017.

STONE 1995

J.C. STONE, *A short history of the cartography of Africa*, *African Studies* 39, Lewiston, 1995.

SURVEY DEPARTMENT 1914

SURVEY DEPARTMENT, *Atlas of Egypt (Vol. I, Lower Egypt et Vol. II, Upper Egypt)*, Ministry of Finance, Le Caire, 1914.

SURVEY OF EGYPT 1924

SURVEY OF EGYPT, *Note on the map reference co-ordinate grid adopted for the maps of Egypt*, s. 1., 1924 (document dactylographié, archives IGN).

WADE 1924

E.B.H. WADE, *Report on the progress of geodesy in Egypt since 1922*, General meeting of the Section of Geodesy of the International Union of Geodesy & Geophysics at Madrid, octobre 1924, Le Caire, 1924.

Institutions

- AIEMA** : Association internationale pour l'étude de la mosaïque antique
AIHV : Association internationale pour l'histoire du verre
AIPMA : Association internationale pour la peinture murale antique
AISCOM : Associazione Italiana per lo Studio e la Conservazione del Mosaico
ICCM : International Committee for the Conservation of Mosaics
NAC : Numismatica Ars Classica
RCRF : *Rei Cretariae Romanae Fautores*

Périodiques et collections

- AAASH** : *Acta Antiqua Academiae Scientiarum Hungaricae* (Budapest)
ABSA : *Annual of the British School of Athens*. Inst. of Class. Stud. (Londres)
AcIr : *Acta Iranica. Encycl. permanente des étud. iraniennes* (Louvain)
AEArq : *Archivo Español de Arqueología*. Ministerio de Educación y Ciencia – Consejo Superior de Investigaciones científicas (CSIC) (Madrid)
AfrIt : *Africa Italiana*. Inst. d'arti grafiche (Bergame)
AION. Quad. : *Annali dell'Istituto universitario orientale di Napoli. Quaderni* (Naples)
AJA : *American Journal of Archaeology*. Archaeol. Inst. of Amer. (New York, Baltimore, puis Norwood)
AJP : *American Journal of Philology* (Baltimore)
ALUB : *Annales littéraires de l'Université de Besançon* (Besançon)
AMGRA : *Annuaire du Musée gréco-romain* (Alexandrie)
AnIsl : *Annales islamologiques*. Inst. franç. d'archéol. orient. (Le Caire)
AntAlex : *Antiquités Alexandrines* (Alexandrie)
APF : *Archiv für Papyrusforschung und verwandte Gebiete* (Leipzig, Stuttgart)
ArchAnz : *Archäologischer Anzeiger* (Berlin)
ARWAW : *Abhandlungen der rheinisch-westfälischen Akademie der Wissenschaften* (Opladen)
ASAA : *Annuario della Scuola archeologica di Atene e delle Missioni italiane in Oriente* (Rome)

- ASAE* : *Annales du Service des Antiquités de l'Égypte* (Le Caire)
- Atti Pontif.* : *Atti della pontificia Accademia romana di archeologia* (Rome)
- AV* : *Archäologische Veröffentlichungen*. Deutsch. archäol. Inst., Abt. Kairo (Wiesbaden)
- BAAL* : *Bulletin d'archéologie et d'architecture libanaises* (Beyrouth)
- BAB* : *Bulletin antieke Beschaving, Annual Papers on Mediterr. Archaeol.* (Amsterdam)
- BAH* : *Bibliothèque archéologique et historique*. Inst. franç. du Proche-Orient (Beyrouth, Damas, Amman)
- BAR* : *Biblical Archaeology Review*. Bibl. Archaeol. Soc. (Washington, D.C.)
- BAR-IS* : *British Archaeological Reports, Internat. Series* (Oxford)
- BCE* : *Bulletin de liaison du Groupe international d'étude de la céramique égyptienne*. Inst. franç. d'archéol. orient. (Le Caire)
- BCH* : *Bulletin de correspondance hellénique* (Athènes, Paris)
- BdE* : *Bibliothèque d'étude*. Inst. franç. d'archéol. orient. (Le Caire)
- BEO* : *Bulletin d'études orientales*. Inst. franç. du Proche-Orient (Amman, Beyrouth, Damas)
- BEFAR* : *Bibliothèque des Écoles françaises d'Athènes et de Rome* (Athènes, Rome, Paris)
- BiAMA* : *Bibliothèque d'Archéologie Méditerranéenne et Africaine* (Aix-en-Provence, Arles)
- BIE* : *Bulletin de l'Institut égyptien* (Le Caire)
- BIFAO* : *Bulletin de l'Institut français d'archéologie orientale* (Le Caire)
- BMBeyr* : *Bulletin du musée de Beyrouth* (Paris)
- BSAA* : *Bulletin de la Société archéologique d'Alexandrie* (Alexandrie)
- BSFE* : *Bulletin de la Société française d'égyptologie* (Paris)
- BSFFT* : *Bulletin de la Société des fouilles françaises de Tanis* (Paris)
- BullAIEMA* : *Bulletin de l'AIEMA* (Paris)
- BullMon* : *Bulletin Monumental* (Paris)
- CabKarn* : *Cahiers de Karnak*. Centre franco-égyptien d'étude des temples de Karnak (CFEETK), Centre nat. de la rech. sc. (Paris)
- CCE* : *Cahiers de la céramique égyptienne*. Inst. franç. d'archéol. orient. (Le Caire)
- CdE* : *Chronique d'Égypte*. Fond. égyptol. Reine Élisabeth (Bruxelles)
- CEA* : *Cahiers des études anciennes*. Univ. du Québec (Montréal)
- CENIM* : *Cahiers d'Égypte nilotique et méditerranéenne*. Inst. d'égyptol. Fr. Daumas, univ. Paul-Valéry (Montpellier)
- CRAIBL* : *Comptes rendus de l'Académie des inscriptions et belles-lettres* (Paris)
- CRIPPEL* : *Cahiers de recherches de l'Institut de papyrologie et égyptologie de Lille*. Univ. de Lille (Lille)
- CSI* : *Cahiers de Studia iranica* (Louvain)
- DACL* : F. CABROL, H. LECLERCQ, *Dictionnaire d'archéologie chrétienne et de liturgie*, 30 vol., 1907-1953, (Paris)
- DAGR* : Ch. DAREMBERG, E. SAGLIO, *Dictionnaire des Antiquités grecques et romaines*, 1,2, Paris, 1875
- DHA* : *Dialogues d'histoire ancienne* (Paris)
- DialArch* : *Dialoghi di archeologia* (Rome, Milan)
- DOP* : *Dumbarton Oaks Papers* (Washington, New York)
- DOS* : *Dumbarton Oaks Studies* (Washington, New York)
- DossArch* : *Dossiers d'archéologie* (Dijon)
- EAA* : *Enciclopedia dell'arte antica, classica e orientale* (Rome)
- EAD* : *Exploration archéologique de Délos*. École franç. d'Athènes (Athènes, Paris)
- EES-ExcMem* : *Egypt Exploration Society Excavation Memoirs* (Londres)
- EMC* : *Échos du monde classique. Class. Views*. Dept. of Class., univ. d'Ottawa (Ottawa)
- Ephesos* : *Ephesos. Forsch. in Ephesos*, veröffentlicht vom österr. archäol. Inst. in Wien (Vienne, Autriche)

- EPRO* : *Études préliminaires aux religions orientales dans l'Empire romain* (Leyde)
- ÉtAlex* : *Études Alexandrines* (Le Caire, Alexandrie)
- ÉtudTrav* : *Études et travaux. Trav. du Centre d'archéol. méditerr. de l'Acad. des sc. polon.* (Varsovie)
- FIFAO* : *Fouilles de l'Institut français d'archéologie orientale* (Le Caire)
- GRBS* : *Greek, Roman and Byzantine Studies*. Duke Univ. (Durham, N.C.)
- HistRel* : *History of Religions. Internat. Journ. for compar. hist. Stud.* Univ. de Chicago (Chicago, Ill.)
- IEJ* : *Israel Exploration Journal*. Israel Explor. Soc. (Jérusalem)
- JAC* : *Jahrbuch für Antike und Christentum* (Münster)
- JDAI* : *Jahrbuch des deutschen archäologischen Instituts* (Berlin)
- JEA* : *Journal of Egyptian Archaeology*. Egypt Explor. Soc. (Londres)
- JGS* : *Journal of Glass Studies*. Corning Museum of Glass (New York)
- JHS* : *Journal of Hellenic Studies*. Counc. of the Soc. for the Prom. of Hell. Stud. (Londres)
- JÖAI* : *Jahreshefte des österreichischen archäologischen Instituts* (Vienne)
- JRA* : *Journal of Roman Archaeology*. Dept. of Class. Stud., univ. du Michigan (Ann Arbor, Mich.)
- JRS* : *Journal of Roman Studies* (Londres)
- LdÄ* : *Lexikon der Ägyptologie* (Wiesbaden)
- LibAnn* : *Liber Annuus. Studium Biblicum Franciscanum* (Jérusalem)
- LIMC* : *Lexicon iconographicum mythologiae classicae* (Zurich, Munich)
- MAAR* : *Memoirs of the American Academy in Rome* (Rome)
- MDAFA* : *Mémoires de la Délégation archéologique française en Afghanistan* (Paris)
- MDAIA* : *Mitteilungen des deutschen archäologischen Instituts, Athen. Abt.* (Berlin)
- MDAIK* : *Mitteilungen des deutschen archäologischen Instituts, Abt. Kairo* (Wiesbaden, Mayence)
- MDAIM* : *Mitteilungen des deutschen archäologischen Instituts, Abt. Madrid* (Mayence)
- MDAIR* : *Mitteilungen des deutschen archäologischen Instituts, Röm. Abt.* (Mayence)
- MEFRA* : *Mélanges d'archéologie et d'histoire de l'École française de Rome. Antiquité* (Rome, Paris)
- MonPiot* : *Monuments et mémoires*. Acad. des inscr. et belles-lettres, Fond. Piot (Paris)
- NAWG* : *Nachrichten von der Akad. der Wissenschaften zu Göttingen, phil.-hist. Kl.* (Göttingen)
- NNM* : *Numismatic Notes and Monographs*. Amer. Numism. Soc. (New York)
- OIP* : *Oriental Institute Publications*. Univ. de Chicago (Chicago, Ill.)
- OLA* : *Orientalia lovaniensia analecta*. Dép. d'étud. orient., univ. cathol. (Louvain)
- PAM* : *Polish Archaeology in the Mediterranean*. Polish Centre of Mediterranean Archaeol. Univ. de Varsovie (Varsovie)
- PapBrux* : *Papyrologica bruxellensia*. Fond. égypt. Reine Élisabeth (Bruxelles)
- PapCol* : *Papyrologica coloniensa* (Cologne)
- ParPass* : *La Parola del passato. Riv. di stud. antichi* (Naples)
- PEQ* : *Palestine Exploration Quarterly*. Palest. Explor. Fund (Londres)
- PM* : B. PORTER, R.L.B. MOSS, *Topographical Bibliography of Ancient Egyptian Hieroglyphic Texts, Reliefs and Paintings*, 7 vol. (Oxford)
- PUE* : *Publications Universitaires Européennes* (Francfort, Berne)
- QAL* : *Quaderni di archeologia della Libia* (Rome)
- RA* : *Revue archéologique* (Paris)
- RAAM* : *Revue de l'art ancien et moderne* (Paris)
- RAAsiat* : *Revue des arts asiatiques. Annales du musée Guimet* (Paris)
- RACF* : *Revue archéologique du Centre de la France* (Vichy)

- RAL** : *Rendiconti dell'Accademia nazionale dei Lincei, cl. di sc. mor., stor. e filol.* (Rome)
- RANarb** : *Revue archéologique de Narbonnaise*. Centre nat. de la rech. scient. (Paris)
- RAPH** : *Recherches d'archéologie, de philologie et d'histoire*. Inst. franç. d'archéol. orient. (Le Caire)
- RBN** : *Revue belge de numismatique et de sigillographie* (Bruxelles)
- RdE** : *Revue d'égyptologie*. Soc. franç. d'égyptol. (Paris, Louvain)
- RE** : A. PAULY, G. WISSOWA *et al.*, *Real-Encyclopädie der classischen Altertumswissenschaft*, 1839-1978 (Stuttgart, Munich)
- REA** : *Revue des études anciennes*. Univ. de Bordeaux III (Talence)
- REG** : *Revue des études grecques* (Paris)
- RevNum** : *Revue numismatique*. Soc. franç. de numism. (Paris)
- RIN** : *Rivista italiana di numismatica e scienze affini* (Pavie)
- RSAC** : *Recherches suisses d'archéologie copte* (Genève)
- RSO** : *Rivista di studi orientali*. Scuola orient., univ. de Rome (Rome)
- SAOC** : *Studies in Ancient Oriental Civilizations* (Chicago, Ill.)
- SPAL** : *Revista de prehistoria y arqueología de la Universidad de Sevilla* (Séville)
- StudHell** : *Studia hellenistica* (Leyde, Louvain)
- StudIr** : *Studia iranica*. Assoc. pour l'avanc. des étud. iran. (Louvain)
- TMO** : *Travaux de la Maison de l'Orient*. Maison de l'Orient et de la Méditerranée (Lyon)
- TravMem (P)** : *Travaux et mémoires*. Centre de rech. d'hist. et civilis. de Byz. (Paris)
- WUNT** : *Wissenschaftliche Untersuchungen zum Neuen Testament* (Tübingen)
- ZÄS** : *Zeitschrift für ägyptische Sprache und Altertumskunde* (Leipzig, Berlin)
- ZPE** : *Zeitschrift für Papyrologie und Epigraphik* (Bonn)

Collection *Études Alexandrines*

Aux presses de l'Institut français d'archéologie orientale, Le Caire :

1. *Alexandrina* 1 (Jean-Yves EMPEREUR éd.), 1998.
2. Véronique FRANÇOIS, *Céramiques médiévales à Alexandrie*, 1999.
3. *Alexandrie médiévale* 1 (Christian DÉCOBERT et Jean-Yves EMPEREUR éd.), 1998.
4. Marie-Dominique NENNA et Mervat SEIF EL-DIN, *La vaisselle en faïence d'époque gréco-romaine : catalogue du Musée gréco-romain d'Alexandrie*, 2000.
5. *Nécropolis* 1 : Tombes B1, B2, B3, B8, 2001 (Jean-Yves EMPEREUR et Marie-Dominique NENNA éd.), 2001.
6. *Alexandrina* 2 (Jean-Yves EMPEREUR éd.), 2002.
7. *Nécropolis* 2 (Jean-Yves EMPEREUR et Marie-Dominique NENNA éd.), 2003.
8. *Alexandrie médiévale* 2 (Christian DÉCOBERT éd.), 2002.
9. *Pharos* 1 (à paraître).
10. *L'exception égyptienne ? Production et échanges monétaires en Égypte hellénistique et romaine* (Olivier PICARD et Frédérique DUYRAT éd.), 2005.
11. Mervat SEIF EL-DIN, *Die reliefierten hellenistisch-römischen Pilgerfläschen, Untersuchungen zur Zweckbestimmung und Formgeschichte der ägyptischen Pilger- und Feldflaschen während des Hellenismus und der Kaiserzeit*, 2006.
12. Elżbieta RODZIEWICZ, *Bone and Ivory Carvings from Alexandria. French Excavations 1992-2004*, 2007.
13. Dominique KASSAB TEZGÖR, *Tanagréennes d'Alexandrie : Figurines de terre cuite hellénistiques des nécropoles orientales, Musée gréco-romain*, 2007.
14. *Alexandria ad Europeam* (Sophie BASCH et Jean-Yves EMPEREUR éd.), 2007.
15. Michael SABOTTKA, *Das Serapeum in Alexandria. Untersuchungen zur Architektur und Baugeschichte des Heiligtums von der frühen ptolemäischen Zeit bis zur Zerstörung 391 n. Chr.*, 2008.
16. *Alexandrie médiévale* 3 (Christian DÉCOBERT et Jean-Yves EMPEREUR éd.), 2008.
17. Jean-Luc FOURNET, *Alexandrie : une communauté linguistique ? ou la question du grec alexandrin*, 2009.
18. *Alexandrina* 3 (Jean-Yves EMPEREUR éd.), 2009.
19. *Alexandrie ottomane* 1 : Michel TUCHSCHERER, *Le renouvellement des privilèges de la nation des Français et des Catalans à Alexandrie en 1528* ; Maria Pia PEDANI, *Reports of Venetian Consuls in Alexandria (1554-1664)*, 2011.
20. Hélène FRAGAKI, *Images antiques d'Alexandrie (I^{er} siècle-VIII^e siècle après J.-C.)*, 2011.
21. Sandrine ÉLAIGNE, *La vaisselle fine de l'habitat alexandrin. Contribution à la connaissance de la mobilité des techniques et des produits céramiques en Méditerranée du I^{er} siècle av. J.-C. à l'époque claudienne*, 2012.

Aux presses du Centre d'Études Alexandrines, Alexandrie :

22. Delphine DIXNEUF, *Amphores égyptiennes. Production, typologie et diffusion (III^e siècle avant J.-C.-IX^e siècle après J.-C.)*, *AmphorAlex* 1, 2011.
23. Claude BRIXHE, *Timbres amphoriques de Pamphylie*, *AmphorAlex* 2, 2012.
24. *Alexandrie médiévale* 4 (Christian DÉCOBERT, Jean-Yves EMPEREUR, Christophe PICARD éd.), 2011.
25. Olivier PICARD, Cécile BRESCH, Thomas FAUCHER, Gilles GORRE, Marie-Christine MARCELLESI, Cécile MORRISON, *Les monnaies des fouilles du Centre d'Études Alexandrines : Les monnayages de bronze à Alexandrie de la conquête d'Alexandre à l'Égypte moderne*, 2012.
26. *L'Enfant et la mort dans l'Antiquité II. Types de tombes et traitement du corps des enfants dans l'antiquité gréco-romaine* (Marie-Dominique NENNA éd.), 2012.
27. Thomas FAUCHER, *Frapper monnaie : La fabrication des monnaies de bronze à Alexandrie sous les Ptolémées*, 2013.
28. Heba MAHMOUD SAAD ABDEL NABY and Delphine DIXNEUF, *Islamic Pottery Part I, Catalogue of the Faculty of Arts Museum 1, Alexandria University*, 2013.
29. Alessio SOPRACASA, *Venezia e l'Egitto alla fine del Medioevo, Le tariffe di Alessandria, Alexandrie médiévale* 5, 2013.
30. PİRİ RE'İS / Evliyâ ÇELEBİ, *Deux regards ottomans sur Alexandrie* (Jean-Louis BACQUÉ-GRAMMONT, Michel TUCHSCHERER éd.), *Alexandrie ottomane* 2, 2013.
31. Hélène FRAGAKI, *Un édifice inachevé du quartier royal à Alexandrie*, 2013.
32. *Alexandrina* 4 (Jean-Yves EMPEREUR éd.), 2014.
33. Gonca CANKARDEŞ-ŞENOL, *Lexicon of Eponym Dies on Rhodian Amphora Stamps, Volume 1, Eponyms A*, *AmphorAlex* 3, 2015.
34. *La batellerie égyptienne : archéologie, histoire, ethnographie* (Patrice POMEY éd.), 2015.
35. Gonca CANKARDEŞ-ŞENOL, *Lexicon of Eponym Dies on Rhodian Amphora Stamps, Volume 2, Eponyms B to K*, *AmphorAlex* 4, 2015.
36. *Alexandria under the Mediterranean* (Georges SOUKIASSIAN ed.), 2015.
37. Gonca CANKARDEŞ-ŞENOL, *Lexicon of Eponym Dies on Rhodian Amphora Stamps, Volume 3, Eponyms Λ to Σ*, *AmphorAlex* 5, 2016.
38. *Alexandrie, Césaréum. Les fouilles du cinéma Majestic. La consommation céramique en milieu urbain à la fin de l'époque hellénistique* (Jean-Yves EMPEREUR éd.), 2017.
39. Gonca CANKARDEŞ-ŞENOL, *Lexicon of Eponym Dies on Rhodian Amphora Stamps, Volume 4, Eponyms T to X*, *AmphorAlex* 6, 2017.
40. Faruk BİLİCİ, *L'expédition d'Égypte, Alexandrie et les Ottomans. L'autre histoire, Alexandrie ottomane* 3, 2017.
41. *Presses allophones de Méditerranée* (Jean-Yves EMPEREUR, Marie-Delphine MARTELLIÈRE éd.), 2017.
42. *LRCW* 5. *Late Roman coarse wares, cooking wares and amphorae in the Mediterranean. Archaeology and archaeometry/La céramique commune, la céramique culinaire et les amphores de l'Antiquité tardive en Méditerranée. Archéologie et archéométrie*, Volume 1 (Delphine DIXNEUF éd.), 2017.

43. *LRCW 5. Late Roman coarse wares, cooking wares and amphorae in the Mediterranean. Archaeology and archaeometry/La céramique commune, la céramique culinaire et les amphores de l'Antiquité tardive en Méditerranée. Archéologie et archéométrie*, Volume 2 (Delphine DIXNEUF éd.), 2017.
44. Ahmet Kaan ŞENOL, *Commercial amphorae in the Graeco-Roman Museum of Alexandria, AmphorAlex 7*, 2018.
45. Cécile HARLAUT et John W. HAYES, *Pottery in Hellenistic Alexandria. Aux origines d'Alexandrie et de sa production céramique. Hellenistic pottery deposits from Alexandria*, 2018.
46. *Constituer la tombe, honorer les défunts en Méditerranée antique* (Marie-Dominique NENNA, Sandrine HUBER et William Van ANDRINGA éd.), 2018.
47. Marie-Cécile NAVET-GRÉMILLET, *L'Alexandrie de Pénélope Delta (1874-1941). Face cachée d'un écrivain grec*, 2019.
48. Rania ABDUL WAHID, Marie-Cécile BRUWIER, Nicolas GAUTHIER et Mona HAGGAG, *Antiquités égyptiennes de la Préhistoire à la Basse Époque, Catalogue du Musée éducatif d'Antiquités de la faculté des lettres de l'université d'Alexandrie 2*, 2019.
49. Mięczysław D. RODZIEWICZ, *Hellenistic painted goblets in Alexandria*, 2020.
50. *Alexandrina 5* (Marie-Dominique NENNA éd.), 2020.

Pour l'achat des 21 premiers titres de la collection des *Études Alexandrines* : Institut français d'archéologie orientale, 37 rue Cheikh Aly Youssef, Mounira, Le Caire, Égypte – www.ifao.egnet.net

À partir du volume 22, pour les ventes en Égypte : Centre d'Études Alexandrines, 50 rue Soliman Yousri, 21131 Alexandrie, Égypte

Pour les autres pays : De Boccard Édition-Diffusion, 4 rue de Lanneau, 75005 Paris, France – www.deboccard.com

The papers in this volume look at Alexandria through its multiple characteristics and its long diachrony. The history and archeology of ancient Alexandria and its heritage are studied through objects relating to Pharaonic or Graeco-Roman statuary, Hellenistic mosaics and toreutics from the end of Antiquity, and the presentation of the results of the rescue excavations carried out by the Centre d'Études Alexandrines on three sites in the Brouchion district, near the royal palaces. A study of the remains of the fortifications, still visible in the city, and of two cisterns at Fort Qaitbay sheds light on our understanding of Medieval and Ottoman Alexandria. Finally, the history and practice of archaeology today are presented through an examination of an epistolary collection of the numismatist Dattàri and the geodetic systems employed in Egypt.



Les contributions de ce volume abordent Alexandrie sous ses multiples facettes et sa longue diachronie. L'histoire et l'archéologie de l'Alexandrie antique et son héritage sont évoqués à travers l'étude d'objets relevant de la statuaire pharaonique ou gréco-romaine, de la mosaïque hellénistique et de la toreutique de la fin de l'Antiquité, et l'exposé de résultats des fouilles de sauvetage du Centre d'Études Alexandrines sur trois chantiers du quartier du Brouchion, voisin des palais royaux. L'étude des vestiges des fortifications, encore visibles dans la ville, et de deux citernes du fort Qaitbay éclairent notre compréhension de l'Alexandrie médiévale et ottomane. Enfin, l'histoire et la pratique de l'archéologie aujourd'hui sont présentées à travers l'examen d'un recueil épistolaire du numismate Dattàri et des systèmes géodésiques employés en Égypte.



تتناول الأعمال الموجودة في هذا المجلد مدينة الإسكندرية من خلال أوجهها المختلفة ومن خلال الفترات الزمنية الطويلة المتعاقبة. تم دراسة تاريخ وعلم الآثار الخاص بالإسكندرية من خلال الأشياء المرتبطة بالتماثيل الفرعونية أو اليونانية-الرومانية، والفسيفساء الهلنستية ومن خلال فن النقش على المعادن الذي يعود لنهاية العصور القديمة. وكذلك من خلال عرض نتائج عمليات التنقيب والحفائر الخاصة بعمليات الإنقاذ التي يقوم بها مركز الدراسات السكندرية في المواقع الثلاثة بحي بروشوين المجاور للقصور الملكية. تساعد دراسة أطلال وبقايا التحصينات التي لا تزال ظاهرة بالمدينة وصهريجي قلعة قايتباي على فهم تاريخ المدينة في العصور الوسطى والفترة العثمانية. وأخيراً، يتم عرض تاريخ وأعمال علم الآثار اليوم من خلال فحص مجموعة رسائل من أخصائي المسكوكات داتاري والأنظمة الجيوديسية المستخدمة في مصر.

Couverture : Plat sassanide du VII^e siècle. © The al-Sabah Collection, Dar al-Athar al-Islamiyyah, Kuwait
Voir l'article de S. Azarnouche, H. Fragaki et Fr. Grenet dans cet ouvrage, p. 97-147



CEAlex 0041-ÉtAlex50-2020
ISBN 978-2-490128-13-6
ISSN 1110-6441



9 782490 128136