

N° d'ordre :



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila-
كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie
قسم الإلكترونيك
Département d'Electronique



MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : GHADBANE BAHA EDDINE

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : ELECTRONIQUE

OPTION : TECHNOLOGIE DES SYSTEMES
ELECTRO-ENERGETIQUES DE SOURCES D'ENERGIE
RENOUVELABLE

Thème

**Etude de conception et réalisation
d'un cadran solaire**

Soutenue le : 08.06.2015 devant le jury composé de :

SAIGAA Djamel	Professeur- Université Mohamed Boudiaf - M'sila -	Président
DRIF Mahmoud	M.A.A - Université Mohamed Boudiaf - M'sila -	Encadreur
DJAZIA Kamel	M.A.A - Université Mohamed Boudiaf - M'sila -	Examineur
GUICHI Omar	M.A.A - Université Mohamed Boudiaf - M'sila -	Examineur

Promotion : Juin 2015

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Je voudrais remercier le bon dieu qui m'a donné la force et le courage pour accomplir ce travail.

Je remercie tout ma famille et surtout **mes parents** pour leur aide et leurs encouragements.

Je remercie aussi mon encadreur **Mr DERIF Mahmoud** pour m'avoir orienté et sur ses précieux conseils.

Et je dédie ce travail à mes amis et mes camarades pour m'avoir soutenu énormément au cours de l'année.

Merci beaucoup

Dédicaces

Avant tout, je remercie dieu le tout puissant
de m'avoir donné le courage et la patience
pour réaliser ce travail malgré toutes les
difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail:

A ma mère et mon père

A mes très chers frères et mes sœurs

A toute ma famille

A mes chers amis

A tous ceux qui j'aime et qui m'aiment.

A tous ceux qui me connaissent

A tous les amis d'étude
surtout S3ER et ceux d'Electrotechnique

Promotion 2014/2015

Sommaire

Introduction général	1
Chapitre 1 Notions du temps et techniques de mesure	
1.1. Introduction	3
1.2. Notion du temps.....	3
1.2.1 Temps en astronomie	5
1.2.2. Temps solaire et seconde de temps moyen	5
1.2.3 Temps des éphémérides et seconde des éphémérides	6
1.2.4. Temps en physique.....	7
1.2.5. Définition de l'année	7
1.2.6. Définition du jour	8
1.2.7. Temps vrai, temps moyen et équation du temps	9
1.2.8. Echelles du temps.....	10
1.2.9. Qu'est-ce que l'heure? L'heure légale?.....	11
1.2.10 les fuseaux horaire	12
1.2.11. Temps solaire moyen	13
1.2.12. Temps solaire vrai	13
1.2.13 Le temps solaire vrai en un lieu	13
1.2.16. Temps officiel ou temps légal.	14
1.3. Techniques de mesure du temps	15
1.3.1. Utilisation du soleil	15
1.3.2. Ecoulement d'un fluide.....	16
1.3.3. Combustion d'un corps	19
1.3.4. L'horlogerie au service de la science.....	20
1.4. Conclusion	20
Chapitre 2 Géométrie solaire	
2.1. Introduction	22
2.2. La sphère céleste.....	22
2.3. Le soleil.....	23
2.4. La terre.....	23
2.4.1. La distance terre-soleil	24
2.4.2. Mouvement de la terre	24

Sommaire

2.4.3. Mouvement de la terre autour du soleil.....	25
2.4.4. Mouvement apparent du soleil	25
2.5. Les systèmes de coordonnées.....	26
2.5.1 Coordonnées géographiques	26
a) Les parallèles.....	27
b) Les méridiens	27
c) La latitude φ	27
d) La longitude λ	27
e) L'altitude	27
2.5.2 Les coordonnées de soleil.....	27
2.5.2.1. Les coordonnées équatoriales	27
2.5.2.2 Coordonnées horizontales ou azimutales	30
a) Hauteur angulaire du soleil h	30
b) Azimut du soleil Ψ	30
c) Angle zénithal θ_z	30
2.5.3. Récapitulatif des angles utilisés	31
2.5.4. La durée du jour	31
2.6. Formules de calcul de la position du soleil par rapport à une face quelconque.....	32
2.6.1 Calcul des coordonnées solaires.....	32
2.6.2. Angle d'incidence du faisceau solaire sur une surface	33
2.7. Diagramme stéréographique pour une latitude donnée	33
2.8. Conclusion	34

Chapitre 3 Cadrans solaires

Résumé	36
3.1. Cadran Solaires et leur principe.....	36
3.2. Différents types du cadran solaire	39
3.2.1. Cadran équatorial	39
3.2.2. Cadran horizontal	40
3.2.3. Le cadran vertical	40
3.2.3.1. Le cadran canonial	40
3.2.3.2. Cadran vertical méridional ou non déclinant	41
a) Limites de fonctionnement.....	41
b) Construction.....	42

3.2.3.3. Le cadran vertical déclinant	42
a) Limites de fonctionnement.....	43
b) Construction.....	43
c) Installation.....	43
3.2.3.4. Cadran déclinant vers le sud-est ou le sud-ouest	44
3.2.3.5. Cadran septentrional ou «plein nord»	45
3.2.3.6. Cadran déclinant nord-est, nord-ouest	45
3. 2.3.6.1. Cadran déclinant nord-est	45
3.2.3.6.2. Cadran déclinant nord-ouest	45
3.2.3.7.1. Cadran occidental.....	46
3.2.3.7.2. Cadran oriental	47
3.2.3.8. Les cadrans inclinés	48
3.2.3.9. Le cadran polaire.....	49
3.3. Équations nécessaires pour concevoir des cadrans solaires plans.....	50
3.3.2. Altitude et azimut du soleil.....	50
3.3.2.1. Position du soleil	50
3.3.3 Position des ombres.....	52
3.3.3.1 Plan de cadran solaire et Nodus	52
3.3.3.2 Coordonnées de Nodus G1 dans le système de coordonnées cadran solaire	54
3.3.3.3 Les ombres des Nodus	54
3.3.4. Passages d'un système de coordonnées à un autre.....	56
3.3.4.1 Formules générales.....	56
3.4. Comment lire l'heure sur un cadran solaire ?.....	57
3.4.1. Correction en longitude.....	57
3.4.2. Correction de l'équation du temps.....	57
3.4.3. L'heure du cadran solaire	59
3.5. Conclusion.....	59
 Chapitre 4 Réalisation et Conception d'un cadran Solaire	
4.1. Objectif.....	60
4.2 Etude théorique	60
4.3 Critère de choix	60
4.4 Détérmation de la postion géographique du site	61
4.5 détermination de l'orientation du mur	61
4.5.1 Méthode de Mesure de la déclinson d'un mur	61

a) à l'aide d'une boussole	62
b) à l'aide de Google Earth	62
c) à l'aide du Logiciel calcad.....	63
4.6. Choix du modèle de cadran.....	64
4.6.1. cadran vertical méridional (plain sud)	64
4.6.2. l'heure Solaire local vrais	64
4.6.3.Algorithme des etapes de calcule et tracer d'un cadran solaire	65
4.7.Partie 1 : Conception d'un cadran méridional (vertical plan sud)	66
4.7.1. Etape 1 : Le traçage des linges d'un cadran solaire	66
4.7.2. Etape 2 : Positionnement du Style	67
4.7.3. Utilisation les formule de calcul sur Execl	69
a) des données d'entrée	69
c) Le résultat a partir «Microsoft Office Excel »	70
4.8. Partie 2 : Contruction d'un cadran Solaire mérodinal	71
4.8.1. Matériel	71
4.8.2. la Réalisticion	71
4.9. Partie 3 : L'Application	75
4.9.1. Le matériel utilisé.....	75
4.9.2. Les Essais	75
4.10. conculsion	78
Conculsion Général	79
Références bibliographiques	80

Liste des figures

Figure 1.1. Cadran Vertical déclinant, Québec, Canada	6
Figure 1.2 .Courbe d'Equation du temps (courbe rouge).	9
Figure 1.3.Courbe Les échelles de temps	9
Figure 1.4. Carte du monde des fuseaux horaires	13
Figure 1.5. Diagramme solaire pour Uccle en temps universel	14
Figure 1.6. L'écart entre les heures normalisées d'un fuseau Horaire	14
Figure 1.7. Mesure du temps naturel de l'antiquité au temps moderne	15
Figure 1.8. Gnomon	15
Figure 1.9. Clepsydre	16
Figure 1.10. Clepsydre à niveau constant	17
Figure 1.11. Clepsydre à soupape	18
Figure 1.12. Horloge de Su Song	18
Figure 1.13: Sablier	19
Figure1.14. Bougie.....	19
Figure 1.15.un cristal de quartz	20
Figure 2.1 : La sphère céleste	23
Figure 2.2: Variation de la distance terre-soleil au cours de l'année.....	24
Figure 2.3: Représentation du mouvement de la terre autour du soleil.....	25
Figure 2.4 : Mouvement apparent du soleil.....	25
Figure 2.5. Coordonnées terrestres d'un lieu donné	26
Figure 2.6 Variation annuelle de la déclinaison solaire	28
Figure 2.7 Coordonnées équatoriales	29
Figure 2.8. Cordonnées horizontales.....	30
Figure 2.9. Déclinaison selon la date.	32
Figure 2.10. Lecture de l'azimut et de l'altitude angulaire,	34
Figure 3.1.exemple d'un cadran vertical méridional	37
Figure 3.2. Méridiennes	38
Figure 3.3. Cadran équatorial	39
Figure 3.4. Cadran Solaire horizontal	40
Figure 3.5. Adolescent au cadran «Cadran canonial de la cathédrale de Strasbourg.....	41
Figure 3.6. Cadran Vertical méridional et cadran Solaire méridional Ankara (Turquie)	42
Figure 3.7. Cadran vertical déclinant d'environ 60°-Est et cadran solaire vertical	43
Figure 3.8. Cadran vertical septentrional déclinant de 180 °	44
Figure 3.9.Cadran déclinant à style multi indicateur et cadran septentrional	44
Figure 3.10. Un cadran septentrional aux Cabanes de Fleury par jean pakh-omoff	45
Figure 3.11. Cadran occidental	47
Figure 3.12. Cadran Solaire Occidental	48
Figure 3.13. Cadrans inclinés déclinants.....	49
Figure 3.14.Face supérieure et face inférieure d'un cadran équatorial.....	50
Figure 3.15. Système de coordonnées équatoriales.....	51
Figure 3.16 : Système de coordonnées horizontales	51
Figure 3.17 : Position du soleil.....	52
Figure 3.18. Système de coordonnées d'un cadran solaire	53

Liste des figures

Figure 3.19 : Ombres d'Nodus	55
Figure 4.1. Coordonnée du pôle Universitaire de M'sila.....	61
Figure 4.2.boussole	62
Figure 4.3. Affichage à partir site de Google Earth	63
Figure 4.4. L'interface d'Affichage de logiciel Calcad	63
Figure 4.5. Déclinaison d'un mur ou cite du pole l'universitaire de Msila.....	63
Figure 4.6. Explication sur L'étape 1	66
Figure 4.7. Le style	67
Figure 4.8. Définir L'orientation du Style d'un cadran Solaire	68
Figure 4.9. Le Style sur Papier millimétrique	68
Figure 4.10. Trace d'un cadran Solaire (Cadran Solaire Vertical plain Sud)	70
Figure 4.11 .Conception Final d'Un cadran Solaire Vertical plain Sud	70
Figure 4.12. Plan d'un cadran Solaire Vertical (plain sud).	71
Figure 4.13. Mesure du cadre pour notre Cadran.....	72
Figure 4.14. Le découpage des tiges d'aluminium.....	72
Figure 4.15. Emplacement de la base.....	73
Figure 4.16. L'état de la base	73
Figure 4.17. Préparation du style	74
Figure 4.18. L'emplacement du style.....	74
Figure 4.19. Le style est placé.....	74
Figure 4.20. Le cadran est fini.....	75
Figure 4.21. Emplacement du cadran par la boussole.....	75
Figure 4.22. Le cadran est bien placer	76
Figure 4.23. Essai n 1	76
Figure 4.24. Le placement du cadran en fonction de la boussole	77
Figure 4.25. L'emplacement du cadran dans autre place	77
Figure 4.26. Suivi L'ombre d'un cadran Solaire.....	78

Introduction générale

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le soleil sous forme de lumière et de chaleur est aussi la plus répandue et la plus répartie dans le monde. Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables. La maîtrise de l'énergie solaire nécessite donc de connaître la position correcte du soleil.

Le soleil est utilisé par l'homme pour s'éclairer (fenêtres, puits de lumière), se chauffer et cuisiner (chauffe-eau solaire, four solaire) ou pour produire de l'électricité par l'intermédiaire de panneaux photovoltaïques et aussi pour connaître le temps à partir la position du Soleil.

La connaissance de la position du soleil dans le ciel à tout instant et en tout lieu est nécessaire pour l'exploitation de l'énergie issue du soleil et pour mesurer le temps de n'importe quelle région par des instruments de mesure du temps.

C'est dès la plus haute antiquité que l'homme a senti le besoin de mesurer le temps qui a toujours été une des préoccupations majeures de l'humanité dès qu'elle réussit à organiser des institutions religieuses, sociales et économiques. Au début, on mesurait le temps à l'aide des étoiles et des astres pour évaluer approximativement les différents moments de la journée, depuis l'homme invente continuellement des moyens précis pour se situer dans le temps.

Afin d'assurer leur bonne marche, il était indispensable que l'écoulement du temps pût être déterminé et contrôlé. On établit alors des calendriers pour définir la succession des jours, des mois et des années, et l'on inventa des systèmes variés pour diviser le temps compris dans une journée, c'est-à-dire entre le lever et le coucher du soleil. Parmi les instruments de mesure du temps, le cadran solaire.

Le cadran solaire est un instrument de mesure permettant de lire l'heure de manière tout à fait originale. Malgré un côté utilitaire perdu au fil du temps, il a conservé un aspect décoratif et artistique, si bien que se développe aujourd'hui la gnomonique qui est l'art de construire les cadrans solaires.

Il est intéressant de se poser la question suivante: *Pour quelles raisons utiliserait-on un instrument préhistorique comportant de nombreux inconvénients dans sa lecture comme divers calculs dépendant du lieu et de la date ou le manque de précision, alors que les montres permettent aujourd'hui une lecture de l'heure simple, rapide et précise?* La perspective artistique, l'envie de comprendre le système solaire et le désir de conserver un lien avec le passé sont des éléments de réponse qui ont motivé ce travail, dans lequel il s'agira d'expliquer les différents domaines liés à la question du cadran solaire et d'en expérimenter la construction. Nous allons voir l'apparition chronologique des différents instruments de mesure du temps au cours de l'histoire.

Dans ce sens, le présent projet de Master a pour objet la mise au point d'un cadran solaire et ce, pour une vulgarisation en milieu étudiant de l'utilisation de l'énergie solaire ainsi que la maîtrise de la position du soleil qui est un paramètre indispensable dans le design des systèmes de poursuite, tels que: les concentrateurs solaires thermiques, les centrales photovoltaïques, etc.

En effet, le présent mémoire est structuré en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous présenterons la notion du temps, l'apparition chronologique des différents instruments de mesure du temps au cours de l'histoire, en traitant notamment la question des variations de la durée du jour au cours de l'année, et nous introduirons l'équation du temps, essentielle dans la lecture d'un cadran solaire.

Dans le deuxième chapitre, nous étudierons la géométrie solaire et les notions d'astronomie relatives à la terre.

Dans le troisième chapitre de ce travail, nous présenterons les cadrans solaires et leurs types et nous nous intéresserons au fonctionnement de cadrans solaires vertical en particulier. Par la suite, nous présenterons les différents calculs permettant de convertir l'heure solaire en heure légale.

Enfin, le chapitre quatrième sera consacré à la conception et la réalisation d'un modèle prototype de cadrans solaires de type vertical non-déclinant (plain Sud). Des tests de validation seront également présentés dans ce chapitre.

Notions du temps et techniques de mesure

1.1. Introduction

Nous avons de la notion de temps une connaissance primaire, vivant dans un présent coïncé entre un passé qui se cristallise dans nos souvenirs et un futur plein d'inconnu. Cette conscience du temps qui s'écoule est une donnée indissoluble de la vie : la présence du temps se manifeste par tout changement tout mouvement ou toute évolution.

Mais, à ce niveau, on se trouve devant un concept vague, presque virtuel. Nous pourrions dire avec Saint Augustin : *« si on ne me le demande pas, je crois savoir ce qu'est le temps ; si on me le demande, je ne le sais plus »* Pourtant, toutes nos expériences personnelles et transmissibles, en d'autres termes notre "bon sens", caractérisent le temps par au moins trois aspects qui paraissent aller de soi. [1]

1.2. Notion du temps

Le **temps** est un concept développé par l'homme pour appréhender le changement dans le monde. Le questionnement s'est porté sur sa « nature intime » : propriété fondamentale de l'Univers, ou plus simplement produit de l'observation intellectuelle et de la perception humaine ? La somme des réponses ne suffit pas à dégager un concept satisfaisant du temps. Mais l'examen minutieux de chacune d'entre elles et de leurs relations apportera d'intéressantes réponses. Toutes ne sont pas théoriques : la « pratique » changeante du temps par les hommes est d'une importance capitale.

Il n'existe pas de mesure du temps comme il existe, par exemple, une mesure de la charge électrique. Dans ce qui suit il faudra comprendre «*mesure du temps écoulé*» en lieu et place de mesure du temps.[2]

L'histoire de la mesure du temps écoulé entre deux événements a évolué à travers les âges et cela ne fut pas sans conséquence sur l'idée que les hommes en eurent au fil de l'histoire. De rudimentaire qu'elle était, sa mesure a gagné aujourd'hui une précision reposant sur l'atome. Ses progrès irréguliers sont donc à relier directement aux transformations du concept de temps. Ses retombées ont affecté bien plus que la simple estimation des durées : la vie quotidienne des hommes s'en est trouvée changée bien sûr, mais aussi et surtout la pensée, qu'elle fût de nature scientifique, philosophique ou encore religieuse.

D'un point de vue scientifique la mesure du temps peut être basée sur la vitesse des processus quantiques (durée de rotation autour d'un cœur d'atome pour un électron par exemple). Mais, passé la définition de sa mesure, les hommes ont plus de difficultés quand il s'agit d'en faire une étude conceptuelle ou philosophique. De plus, la découverte d'Einstein sur la relativité, qui implique non seulement que le temps est relatif (c'est-à-dire qu'il dépend de l'observateur) mais aussi qu'espace et temps sont intimement liés, bouleverse notre compréhension du temps.[2]

Depuis toujours, les êtres humains cherchent à se situer dans le temps en observant le cycle des saisons, le cycle du jour et de la nuit.

Au fil des siècles, ils trouvent des théories et des objets pour appréhender et se représenter le temps.

Les découvertes scientifiques (datation de matières au Carbone 14, carottage de glace, etc.) permettent aujourd'hui de dater et de comprendre avec précision des événements de l'histoire géologique de la Terre.

La notion du temps est le plus souvent associée à trois termes :

- La chronologie, qui désigne la succession d'événements.
- La simultanéité, qui signifie que deux événements se produisent à la même date dans des lieux différents.
- La durée qui est liée à la mesure du temps. [3]

Dès l'aube de l'humanité, l'homme a cherché à mesurer le temps pour prévoir le retour des saisons froides ou chaudes afin, par exemple, d'assurer sa subsistance. C'est l'alternance des jours et des nuits, donc le mouvement apparent du Soleil dans le ciel, qui va, entre autre, s'imposer à lui.

Ce sont donc des considérations pratiques qui ont guidé les premières recherches sur le temps. Mais le concept de temps est aussi une question scientifique et philosophique de la plus haute importance. Cette quête fondamentale de connaissances conduit aujourd'hui les scientifiques à des recherches en physique de très haut niveau.

Historiquement, on peut dire que la mesure du temps est essentiellement de nature astronomique. Elle ne deviendra l'affaire des physiciens que beaucoup plus tard, dans le courant du vingtième siècle. [4]

1.2.1 Temps en astronomie

Tous les phénomènes périodiques peuvent être utilisés pour définir une échelle de temps. Une idée vient donc naturellement en regardant le ciel : utiliser l'alternance des jours et des nuits, donc le mouvement du soleil, comme phénomène de base pour construire une échelle de temps. L'utilisation du mouvement du soleil est le principe de base de fonctionnement des cadrans solaires. Un des premiers cadrans qui nous soit parvenu est un cadran solaire égyptien qui date d'environ 1500 ans avant Jésus-Christ mais l'art des cadrans solaires, la gnomonique, ne connaîtra son apogée que vers les XVIème et XVIIème siècles. [5]

1.2.2. Temps solaire et seconde de temps moyen

Le temps donné par les cadrans solaires est ce que l'on appelle en astronomie le temps solaire vrai d'un lieu. Ce temps est donc un temps local qui n'est pas uniforme à cause de la non uniformité du mouvement du Soleil dans le ciel. Cela tient au fait que le Soleil vrai se déplace sur une orbite elliptique suivant les lois de Kepler, dans le plan de l'écliptique. Ce temps fût d'un usage très courant jusqu'au XVIIIème siècle. Le développement rapide des moyens de communication rendit cependant obligatoire l'adoption d'un temps solaire moyen. Ce temps solaire moyen est donné par un soleil moyen (fictif) se déplaçant sur une orbite circulaire, à vitesse constante, dans le plan de l'équateur céleste. Ce temps solaire moyen est à l'origine de la première définition astronomique de la seconde jusqu'en 1960 : c'était la 86400ème partie du jour solaire moyen.

La différence entre temps solaire moyen et temps solaire vrai s'appelle l'équation du temps. . [5]

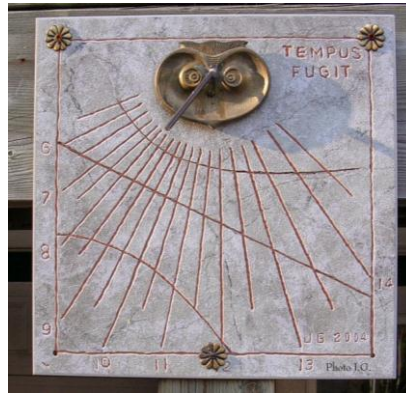


Figure 1.1. Cadran Vertical déclinant, Québec, Canada [6]

Les variations du temps solaire vrai par rapport au temps solaire moyen sont de nature essentiellement géométrique. Newton est probablement le premier à avoir pensé à la non uniformité du mouvement de la Terre puisqu'il mentionne explicitement dans son livre des Principes (1686) que les astronomes doivent corriger le temps vrai fourni par l'observation du Soleil de l'équation du temps. Il ajoute également: « *il se peut qu'il n'existe aucun mouvement uniforme par lequel le temps puisse être mesuré avec précision* ». Kant en 1754, puis Lalande en 1771 émettront des doutes quant à l'uniformité du mouvement de rotation de la Terre, et par voie de conséquence de celui du Soleil dans le ciel. On sait aujourd'hui que la rotation de la Terre n'est pas uniforme : le frottement des marées océaniques sur l'écorce terrestre, les variations saisonnières d'origine météorologique sont des causes maintenant bien connues de non uniformité de la rotation terrestre. [5]

1.2.3 Temps des éphémérides et seconde des éphémérides

Tout cela a conduit les astronomes à construire une autre échelle de temps fondée sur le mouvement orbital (révolution) de la Terre autour du Soleil. Cette nouvelle échelle de temps légalement en usage entre 1960 et 1967 s'appelle le temps des éphémérides. Elle est basée sur l'observation de la longitude du Soleil dans le ciel au cours de l'année. L'équation qui définit numériquement la longitude du Soleil a été donnée par Newcomb et a été adoptée officiellement en 1952 par l'Union astronomique internationale. C'est un polynôme du second degré du temps. Si donc on observe la longitude du Soleil on en déduit aisément l'instant correspondant dans l'échelle de temps des éphémérides. En 1960 la onzième conférence générale des poids et mesures décida que la seconde est la fraction $1/31556925.9747$ de l'année tropique pour le 0 janvier 1900 à 12 heures de temps des éphémérides.

La définition du temps des éphémérides est difficile à réaliser en pratique. Elle est également difficile à comprendre par des non astronomes : l'accessibilité et l'universalité qui sont

des propriétés attendues des échelles de temps ne sont donc pas respectées. Cela a conduit à l'abandon de cette échelle de temps au profit de l'échelle de temps atomique qui est à l'heure actuelle notre meilleure référence. [7]

1.2.4. Temps en physique

C'est en 1955 que le premier étalon de fréquence fut construit par L. Essen et J. Parry qui travaillaient au National Physical Laboratory de Londres. Ces premiers travaux ouvrirent la voie à une nouvelle définition de la seconde qui vit le jour en 1967 lors de la treizième conférence générale des poids et mesures. La seconde est la durée de **9192631770** périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins $F=3$ et $F=4$ de l'état fondamental $6S_{1/2}$ de l'atome de césium 133. Malgré une complexité apparente au moins aussi grande que celle de la définition de la seconde de temps des éphémérides, cette définition offre l'avantage d'une bien meilleure accessibilité. [7]

1.2.5. Définition de l'année

L'année semble être facile à définir : c'est la durée nécessaire à la Terre pour faire un tour complet autour du Soleil. En fait ce n'est pas si simple. L'année intervient dans notre calendrier et le fait que la terre ait accompli un tour complet (360°) n'est pas un critère fondamental.

Si on prend une direction fixe dans l'espace, la terre mettra 365 jours 6 h 9 mn 10 s pour revenir dans cette même direction. On appelle cette durée ***l'année sidérale***.

Si on considère la direction du point vernal de la date (équinoxe de printemps), la terre mettra 365 jours 5h 48min 45s pour revenir dans la direction de ce point. C'est une durée différente de l'année sidérale puisque le point vernal a bougé pendant que la terre tournait. On appelle cette durée ***l'année tropique***. Si on considère le point de l'orbite de la terre le plus près du Soleil (le périhélie, actuellement le 3 janvier), la terre mettra 365 jours 6h 13min 53s pour y revenir. On appelle cette durée ***l'année anomalistique***. Si on considère la direction du nœud de l'orbite lunaire, la terre mettra 346 jours 14h 24min pour y revenir. On appelle cette durée ***l'année draconitique***.

On voit que l'on a le choix pour définir une année. Ce choix sera dicté par des considérations sociales, culturelles et religieuses. Notre calendrier (*grégorien*) a adopté ***l'année tropique*** parce qu'elle fait revenir les saisons à la même date chaque année (*calendrier solaire*).

Le calendrier chinois utilise l'année sidérale parce qu'il se cale sur le mouvement des astres dans le zodiaque (par rapport aux étoiles fixes). L'année draconitique ne sert que pour déterminer la périodicité des éclipses de Soleil. Les calendriers lunaires (comme le calendrier

musulman) privilégient une bonne approximation des mois sur les lunaisons. Ils sont indépendants du mouvement de la terre autour du soleil. [5]

1.2.6. Définition du jour

Si on considère une direction fixe dans l'espace, il faudra 23h 56m 4s à un observateur pour la retrouver dans la même direction après un tour complet de la Terre autour de son axe. Mais ce n'est pas cette durée qui est perceptible. On aura beaucoup plus l'impression que la Terre a accompli un tour si c'est le Soleil qui revient à la même position. C'est ce retour du Soleil dans la même direction qui définit le jour moyen qui lui, dure en moyenne, 24 heures.

Le jour n'est pas, a priori, une simple unité de temps pour compter des durées, mais c'est plutôt un intervalle de temps centré sur une période de « *jour* » et encadré par des périodes de « *nuit* ». Nous allons donc définir le jour comme la durée qui sépare deux passages consécutifs du soleil à son point culminant, c'est-à-dire au "méridien" du lieu. Mais une telle durée est variable : pourquoi ?

Tout d'abord, et nous le verrons plus loin (lois de Kepler), l'orbite apparente du Soleil autour de la Terre (en fait, l'orbite réelle de la Terre autour du Soleil) n'est pas un cercle mais une ellipse : ainsi la vitesse apparente du Soleil sur la sphère céleste va varier selon sa position sur sa trajectoire. Le Soleil passera donc au méridien soit en avance quand il va plus vite, soit en retard quand il ralentit, par rapport à une position moyenne. Pour que nos heures soient régulières et que midi n'arrive pas un peu en avance ou un peu en retard, on construit une position moyenne théorique du Soleil qui définira le Temps solaire moyen, échelle de temps qui a été en usage jusque dans les années 1970. La définition officielle de cette échelle de temps était : « *l'heure légale en France est le temps solaire moyen de Paris retardé de 9m 21s et augmenté de douze heures (c'est la définition du Temps universel internationalement reconnu) et aussi augmenté d'une heure en été et de deux heures en hiver (c'est l'heure d'été ou l'heure d'hiver)* ». Le retard de 9min 21s sert à nous mettre à l'heure du méridien international (Greenwich), l'avance de douze heures sert à faire commencer le jour à minuit (c'est plus pratique car le temps moyen fait débiter le jour à midi au moment du passage du Soleil au méridien) et enfin le décalage d'une heure ou de deux heures nous donne l'heure d'été ou l'heure d'hiver. Les fuseaux horaires sont là pour permettre un décalage similaire pour les pays situés loin du méridien international. [5]

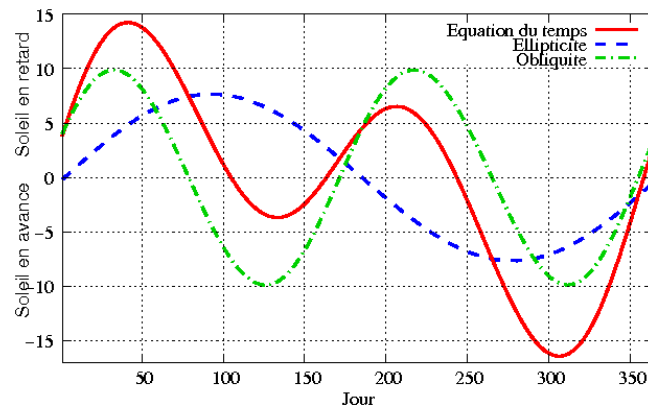


Figure 1.2 .Courbe d'Equation du temps (courbe rouge).[8]

1.2.7. Temps vrai, temps moyen et équation du temps

C'est cette différence entre le Soleil moyen et le Soleil vrai qui nous fait dire en janvier : "tiens, les jours rallongent plus le soir que le matin". En fait, c'est le midi vrai qui se déplace et arrive de plus en plus tard par rapport au midi moyen. Cet écart entre le midi moyen et le midi vrai est évidemment fondamental lorsque l'on construit un cadran solaire qui lui, va donner le temps vrai du lieu. Cette différence est appelée "équation du temps". Elle atteint 16 minutes au maximum fin octobre.

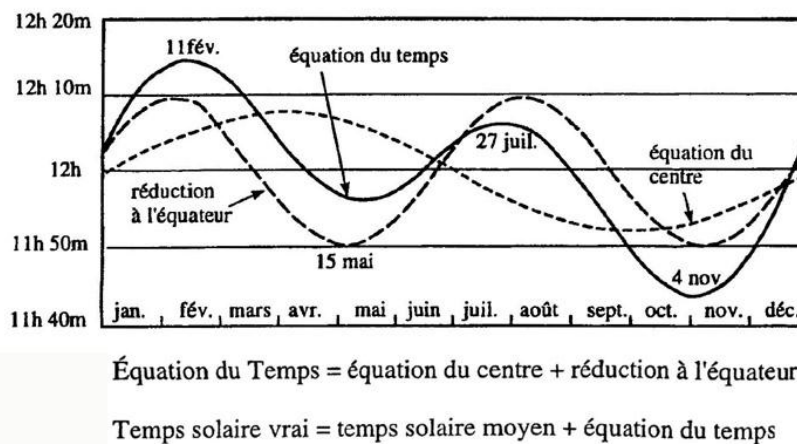


Figure 1.3.Courbe Les échelles de temps [9]

L'équation du temps est en fait la résultante de deux effets :

- l'équation du centre due à l'excentricité de l'orbite terrestre (la trajectoire de la Terre est une ellipse que l'on veut ramener à un cercle sur la sphère céleste)
- la réduction à l'équateur due à l'obliquité de l'écliptique (la Terre ne tourne pas dans son plan équatorial autour du Soleil) puisque l'on mesure le passage du Soleil au méridien du lieu par rapport au plan équatorial terrestre dans lequel il faut donc le ramener.

Plus simplement, disons que la Terre tourne autour de son axe dans le plan de l'équateur et autour du Soleil dans le plan de l'écliptique. C'est l'avance (ou le retard) du Soleil, par rapport à un mouvement uniforme dans l'écliptique, qui doit se projeter sur l'équateur. [4]

1.2.8. Echelles du temps

La rotation diurne de la terre autour de son axe a longtemps semblé suffisamment uniforme pour servir de base à l'échelle de temps utilisée par les astronomes et appelée *Temps universel*. Dans cette échelle de temps, la seconde est définie comme étant égale à $1/86400$ du jour solaire moyen. Mais on s'est aperçu que la terre ralentissait en constatant, par exemple, que la lune s'éloignait de la terre d'une manière qui n'était pas en accord avec les calculs théoriques. L'erreur ne provenait pas de ces calculs, mais du fait que le temps universel n'était pas une échelle de temps uniforme.

Les astronomes ont alors introduit une nouvelle échelle de temps, plus stable, fondée sur la révolution de la terre autour du soleil, appelé *Temps des éphémérides*. La durée de l'année n'est cependant pas vraiment stable non plus et on utilise actuellement une échelle de temps construite différemment: on fabrique, à l'aide d'horloges atomiques (mesurant les fréquences des atomes), une «seconde» particulièrement stable. On va alors ajouter ces secondes les unes derrière les autres pour fabriquer une échelle de temps, le temps atomique international indépendant des mouvements célestes.

Le *temps atomique* international est une moyenne des horloges atomiques réparties dans le monde. On n'insistera pas sur le fait que les effets relativistes montrent que cette seconde dépend du repère où l'on se place: on arrive là à un niveau de précision très élevé et les solutions pour utiliser ces échelles de temps sont complexes. Par contre, l'utilisation du Temps atomique international, très stable, va entraîner un décalage avec la rotation de la terre et il faudra recalibrer cette échelle de temps régulièrement pour que midi reste à midi. C'est pour cela que l'on annonce régulièrement qu'une seconde va être ajoutée de temps en temps le 31 décembre ou le 31 juillet, selon les variations de la rotation de la terre, pour que l'échelle de temps usuelle ne s'écarte pas de plus d'une seconde du temps astronomique qu'est le temps universel. Cette échelle de temps atomique modifiée par l'ajout régulier d'une seconde s'appelle le *Temps universel coordonné*. L'échelle de temps stable et uniforme employée pour les calculs astronomiques est maintenant le Temps terrestre, échelle de temps dont la réalisation pratique est liée au Temps atomique international, et qui prolonge le *Temps des éphémérides*. [4]

1.2.9. Qu'est-ce que l'heure? L'heure légale? L'heure lue à notre montre L'heure diffusée par l'horloge parlante?

L'heure nous permet de mesurer l'écoulement du temps au cours de la journée. Elle mesure une durée depuis le début du jour contrairement aux numéros des jours, des mois, des années, des siècles, des millénaires, qui indiquent un numéro d'ordre dans une chronologie (voir la page sur les calendriers).

La seule heure naturelle que nous pouvons percevoir est l'heure donnée par le Soleil liée à l'alternance jour-nuit : le Soleil nous indique le midi (c'est le moment où il est au plus Haut dans le ciel) d'où nous déduisons le "minuit". Par convention, nous décomptons 24 heures au cours d'une journée de midi à midi ou de minuit à minuit. Pendant des siècles, l'heure du Soleil fut la seule accessible grâce aux cadrans solaires. On définit ainsi le **temps solaire vrai** en un lieu comme l'angle horaire du Soleil en ce lieu pour un instant donné. C'est une notion hybride qui traduit à la fois le mouvement de la Terre autour de son axe et son mouvement de révolution autour du Soleil.

L'heure solaire présente cependant plusieurs inconvénients : tout d'abord elle est locale, c'est-à-dire qu'elle dépend du lieu où on se trouve. Ensuite, elle n'est pas uniforme du fait de l'excentricité de l'orbite terrestre (voir la page sur les échelles de temps). Ce dernier inconvénient a été résolu en utilisant un **temps moyen** résultant d'une moyenne sur une année dont on connaît l'écart au temps solaire vrai par l'équation du temps. Il reste encore le problème d'une heure qui dépend du lieu où on se trouve. Ce problème a été résolu au XIX^{ème} siècle sous l'impulsion des compagnies de chemins de fer. On a trouvé préférable d'utiliser la même heure partout, l'heure de Paris définie par le **temps civil** de Paris, défini lui, comme étant le temps moyen de Paris augmenté de 12 heures. Cette stipulation vient du fait que le temps moyen fait commencer le jour à midi (c'est le seul instant observable), ce qui n'est pas pratique dans la vie de tous les jours.

Cette méthode de temps unique pour un pays réglé sur le temps moyen de l'une des villes pose à nouveau le problème de coordonner une heure dans le monde entier. Mais s'il est possible d'imposer l'heure de Paris dans toute la France (l'écart au temps solaire vrai ne dépasse pas 30 minutes environ), il sera plus difficile de l'imposer au reste du monde du fait du décalage au temps solaire vrai qui ira grandissant en s'éloignant du lieu de référence. Cela a amené les états à se mettre différencierient que d'un nombre entier d'heures, par la création de "fuseaux horaires".

Le temps universel est donc une échelle de temps universelle, comme son nom l'indique. Par convention internationale, le temps universel est le temps moyen de Greenwich, augmenté de 12 heures [10].

1.2.10. Les fuseaux horaires

Chaque pays va définir son heure par l'écart au temps universel. Cet écart étant déterminé de façon à ce que l'heure adoptée respecte le cycle journalier lié au lever du Soleil, au midi, et au coucher du Soleil. Cependant, pour faciliter les changements d'heure pour les voyageurs, les accords internationaux prévoient d'adopter un écart au temps universel égal à un nombre entier d'heures. Pour cela, on définit 24 zones autour du globe appelées "fuseaux horaires". Chaque pays se rattache ainsi au fuseau le mieux adapté et définit son heure légale ou standard comme TU (temps universel) + ou - N heures (où N est un nombre entier). Cela ne l'empêche pas d'ajouter ou de retrancher une heure pour définir une heure d'été ou autre. Les pays très étendus en longitude adoptent plusieurs heures légales (par exemple aux USA, il y a 7 heures légales : Atlantique, Est, Central, Montagne, Ouest, Alaska et Hawaï, avec deux variantes : l'heure standard applicable en hiver et l'heure "de la lumière du jour" qui correspond à notre heure d'été puisqu'on l'applique en été en ajoutant une heure à l'heure standard). [10]

L'existence de fuseaux horaires va entraîner l'existence d'une "ligne de changement de date". Examinons en effet l'écart des heures locales au temps universel. En allant vers l'Est, le Soleil va se lever plus tôt et donc, pour obtenir les heures locales on va ajouter une heure, puis deux, puis trois au temps universel en se déplaçant vers l'Est. En allant vers l'Ouest ce sera le contraire : on retirera des heures au temps universel pour que midi reste à 12 heures... En effet, s'il est midi en France, les pays situés à l'Est de la France sur une même latitude verront le Soleil vers la France, c'est-à-dire vers l'Ouest, c'est donc que ce sera l'après-midi et qu'il sera plus tard qu'en France et qu'on ajoutera une ou plusieurs heures à l'heure française pour obtenir l'heure locale. Donc en allant vers l'Est on ajoute des heures : on arrive à la ligne de changement de date quand on a ajouté douze heures. S'il est midi en temps universel, il sera minuit le soir du même jour sur le dernier fuseau vers l'Est que l'on notera FE. En allant vers l'Ouest, on retranchera des heures et il sera 0 heure du même jour en arrivant sur le dernier fuseau vers l'ouest que l'on notera FO. Les deux fuseaux concernés sont en fait côte à côte et une heure plus tard, il sera 1 heure du même jour sur le fuseau FO et une heure du lendemain sur le fuseau FE qui vient de passer minuit. Le passage de la ligne de changement de date fait donc effectivement passer d'un jour à l'autre à une même heure ou plutôt à un même moment de la journée. Notons cependant que tout le monde est à la même heure et à la même date en temps universel, ce qui permet de s'y retrouver.

On trouvera ci-dessous la répartition des heures légales selon les fuseaux horaires sur tous les continents. Remarquons que certains territoires comme le Groenland ou l'Antarctique n'ont pas d'heure légale propre: le Temps Universel y est donc utilisé. Remarquons aussi que tous les

pays n'ont pas adopté un décalage d'un nombre entier d'heures avec le Temps Universel comme l'Inde qui a adopté 5h 30m. les pays adoptant une heure d'été ajoutent une heure au décalage ci-dessous pour leur période d'été. [10]

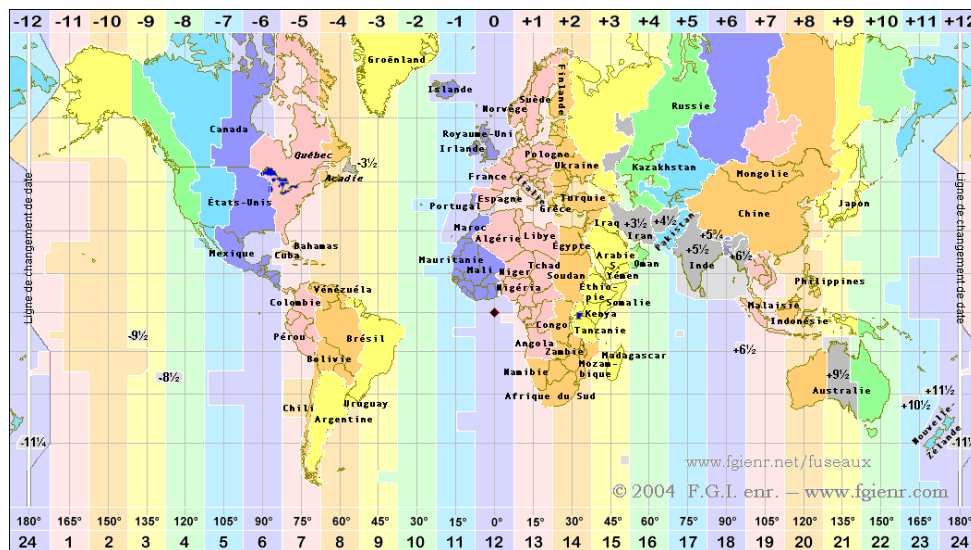


Figure 1.4. Carte du monde des fuseaux horaires [10]

1.2.11. Temps solaire moyen

Le temps solaire s'appuie sur le "midi solaire", c'est-à-dire sur le moment de la journée où le soleil est au zénith dans le ciel. Le temps solaire "moyen" est une mesure de temps qui se base sur le mouvement circulaire effectué par la Terre à vitesse constante autour d'un soleil virtuel. Un jour solaire moyen dure 24 heures, quel que soit le jour de l'année. [11]

1.2.12. Temps solaire vrai

Le temps solaire vrai est une mesure en temps réel qui se base sur le moment où la position du soleil dans le ciel est la plus élevée. Contrairement au temps solaire moyen, qui est constant, le temps solaire vrai varie tout au long de l'année, du fait de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre et de l'excentricité de son orbite autour du Soleil. [11]

1.2.13 Le temps solaire vrai en un lieu

Sur un diagramme solaire on repère l'heure solaire par la position du soleil au-dessus de l'horizon à une date donnée ; le midi solaire ou midi vrai correspond à la hauteur maximum du soleil lors de son passage au méridien du lieu. Ce temps se compte de 0 à 24 heures à partir de midi. [12]

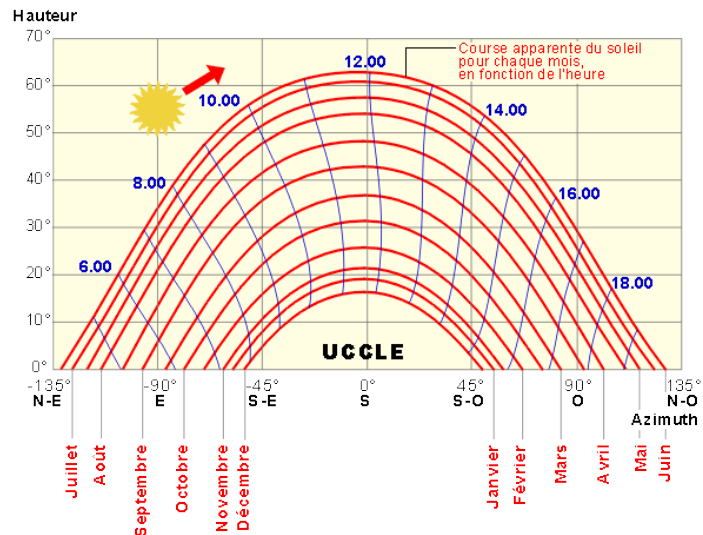


Figure 1.5. Diagramme solaire pour Uccle en temps universel. [13]

1.2.14. Temps officiel (temps légal).

Pour bénéficier de la commodité d'une même heure de référence dans une région assez étendue, on a divisé la terre en 24 fuseaux horaires ou secteurs longitudinaux de 15° chacun (soit au total $24 * 15^\circ = 360^\circ$, ou un tour complet), allant d'un pôle à l'autre. L'écart entre les heures normalisées d'un fuseau au suivant est d'une heure. Soit 24 heures pour un tour complet (1 heure correspond donc à un écart de 15° en longitude, soit 4 minutes par degré).[12]

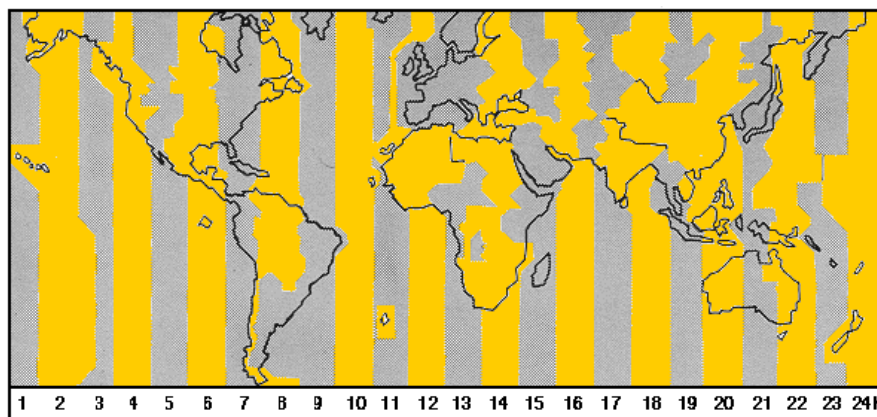


Figure 1.6. L'écart entre les heures normalisées d'un fuseau Horaire [12]

Donc le temps officiel ou légal diffère du temps universel d'un nombre entier d'heures selon des règles définies par la loi dans chaque pays et qui peuvent changer suivant la saison (heure d'été). Ce nombre entier suit approximativement le système théorique des fuseaux horaires

1.3. Techniques de mesure du temps

Après avoir défini les principales unités de la mesure du temps, il paraît important de parler des techniques de mesure du temps. Ainsi nous allons essayer de comprendre comment l'évolution de la société entraîne l'évolution des techniques de mesure du temps. Avant de nous plonger dans les différentes périodes et inventions, il semble intéressant de visualiser les quelques inventions clés :

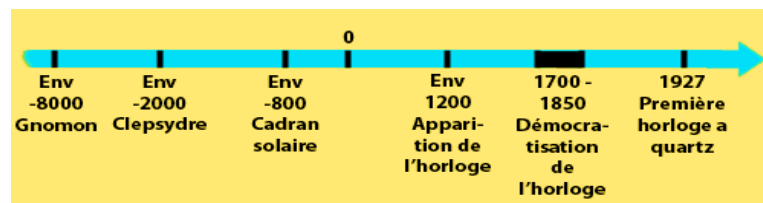


Figure 1.7. Mesure du temps naturel de l'antiquité au temps moderne

1.3.1. Utilisation du soleil

Le mouvement du soleil dans la journée et par conséquent le mouvement de l'ombre a certainement été constaté très tôt pendant la préhistoire. L'observation de l'ombre d'un bâton, appelé gnomon, a donc été la toute première technique de mesure du temps qu'on peut dater environ à 8000 ans avant J.C.

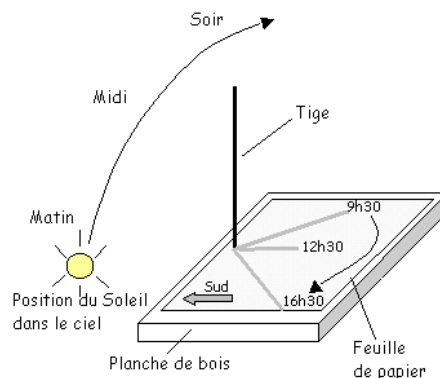


Figure 1.8. Gnomon

Chez les Egyptiens, il était nécessaire pour les prêtres de déterminer les cérémonies religieuses. Cette civilisation qui vénérât le soleil utilisa nécessairement le *Gnomon* pour organiser les cérémonies religieuses. Puis en voulant fixer une cérémonie, ils ont ajouté une planche graduée à ce bâton, et ont donné naissance au cadran solaire en 1500 avant J.-C. Cette technique a longtemps été utilisée pour diviser les journées. Les Egyptiens divisaient le jour en 12 parties, comme expliqué dans la partie L'heure et la seconde.

Les Grecs ont fait devenir l'art des cadrans solaires une science, la gnomique ; science qui perdurera jusqu'à la généralisation de l'horloge. L'usage du temps organisait désormais la vie

sociale et commerciale, d'après Platon dans son livre des lois: « Auparavant l'usage des heures, l'on distinguait ainsi le jour du temps de la négociation, le temps du dîner et le temps du souper ».

L'inconvénient de tel système est que les heures ne sont pas fixes. Une journée dure 12h en hiver comme en été, les heures n'ont donc pas la même durée. En Egypte ce phénomène était moins remarquable qu'en Europe. Le premier cadran Romain serait daté de -263.

L'Europe où les latitudes sont plus élevées, ne s'intéressera vraiment au cadran solaire qu'à partir du moyen âge. Les premiers cadrans européens divisaient simplement la journée, pour repérer les heures de début de travail, heure de fin et heure de pauses.

Les cadrans solaires indiquaient l'heure vraie, c'est-à-dire l'heure de la position du soleil qui ne variait qu'en fonction de la longitude. Cela ne posait aucun problème puisque les communications entre points éloignées se faisaient de façon très lente.

En Europe toujours principalement pour indiquer les heures de prières ou de travail, durant le moyen-âge des progrès exceptionnels sont fait en Gnomique. Plusieurs types de cadrans apparaissent afin d'obtenir l'heure la plus fixe possible. Pour la plupart il faut les orienter dans l'axe du pôle, et incliner le style de façon à être parallèle à l'axe de la terre. [14]

1.3.2. Ecoulement d'un fluide

Deux inconvénients majeurs sont incombés aux systèmes solaires, d'une part il est difficile de mesurer une durée, car le soleil bouge lentement et qu'une division de cadran solaire représente une durée qui varie au fil des saisons. D'autre part le soleil n'était pas toujours présent : la nuit ou part temps couvert plus aucun moyen de mesure du temps n'était disponible. Il était donc nécessaire de trouver un instrument qui soit capable de mesurer une durée d'une longueur fixe.



Figure 1.9. Clepsydre

Chez les égyptiens le temps était toujours géré par les prêtres, il s'agissait simplement de «compter» le temps une fois le soleil couché. Vers 2000 avant J.-C. ils inventaient la clepsydre, simple vase percé rempli d'eau, possédant parfois quelques graduations.

Les Grecs qui avaient une organisation sociale, religieuse et militaire très élaborée avaient besoin d'une certaine organisation. Ainsi les cadrans solaires rythmaient la vie, et la clepsydre servait principalement dans la vie politique pour limiter les paroles. Aristote explique dans la Constitution d'Athènes : « *Il y a au tribunal des clepsydras munies de tuyaux pour l'écoulement. On y verse l'eau dont la mesure détermine la durée des plaidoiries* ».

Clepsydre vient du grec "Klepsydra", qui signifie voleur d'eau, référence certaine au temps qui coule. Mais la précision des clepsydras Egyptienne ne paraît pas suffisante. En effet au fur et à mesure que le liquide s'écoule, le débit diminue. La forme tronconique permettait de diminuer légèrement ce phénomène.

Ctésibios au III^{ème} siècle avant J-C eu l'idée de maintenir le niveau du vase « verseur » (B) constant, et de regarder le niveau du vase «récepteur» (C).[14]

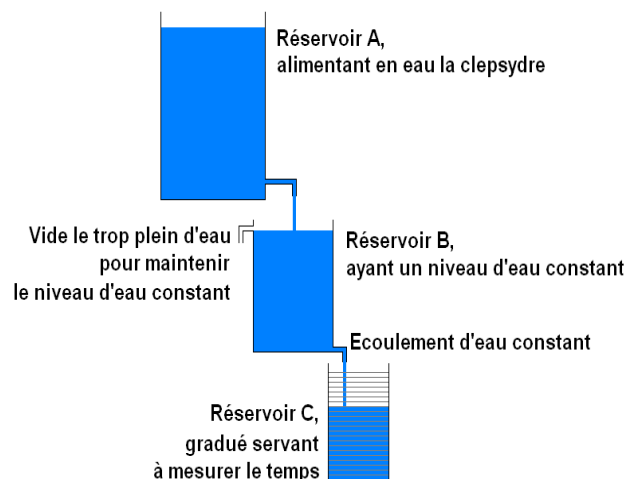


Figure 1.10. Clepsydre à niveau constant

Certaines sources disent qu'il serait également à l'origine de l'ajout d'un flotteur qui viendrait obstruer l'arrivée d'eau quand elle dépasse une certaine hauteur.

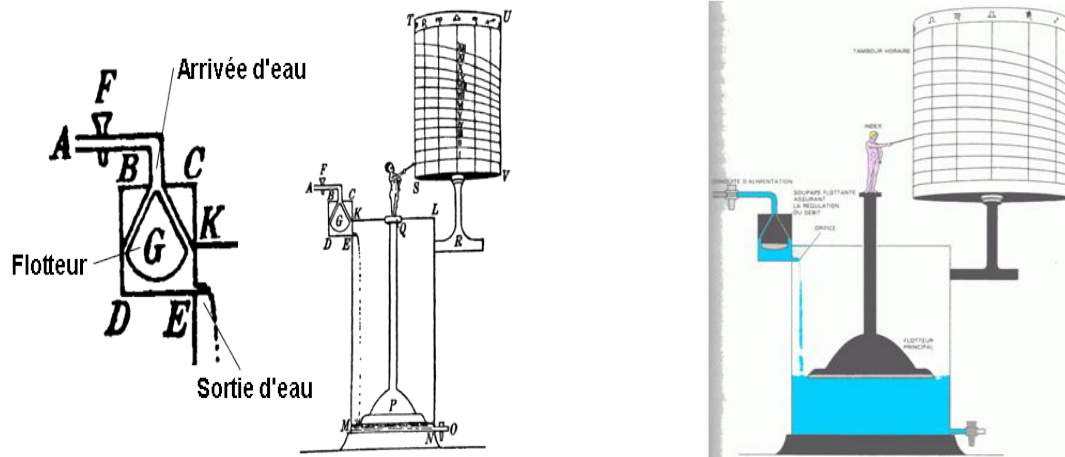


Figure 1.11. Clepsydre à soupape[14]

D'autres phénomènes seraient également à prendre en compte tel que la température, et la pureté de l'eau pour en faire une mesure parfaite.

Pour pouvoir mesurer le temps, la nuit ou par absence de soleil, il perfectionna la clepsydre, pour créer des horloges à eau. L'ajout d'un flotteur, surmonté d'une figurine indiquait l'heure sur une colonne graduée. Par la suite, pour l'assimiler à un cadran solaire, des horloges à eau munies d'un cadran et d'une aiguille apparaissaient, notamment chez les arabes, qui en faisaient en objet d'art, avec l'ajout d'automates.

Quelques années plus tard toutes les civilisations utilisaient des clepsydres ou horloge solaire. On combinait l'heure vraie du cadran solaire, avec l'heure juste de la clepsydre. Au moyen âge beaucoup d'horloges à eau furent construite afin d'indiquer l'heure de la façon la plus juste possible.

Quelques réalisations sont assez remarquables, comme l'horloge astronomique de Su Song en Chine, qui était autant assimilable à un automate, qu'à une horloge :

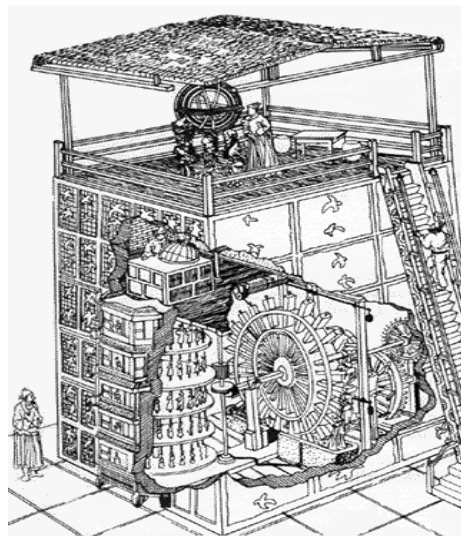


Figure 1.12. Horloge de Su Song [14]

Alors que la gnomique et l'horloge à eau atteignaient leur apogée, le problème des pressions de la clepsydre et l'imprécision des cadrans solaires fit apparaître quelques autres techniques. Notamment au XIIème siècle le sablier. Ce système a un débit indépendant de la quantité de sable, mais seulement de la pente de l'orifice. En 1725, Daniel Bernoulli gagne le concours de l'académie Royale des Sciences de Paris en calculant cette pente. [14]



Figure 1.13: Sablier

L'imprécision des horloges sur un bateau en firent un instrument remarquable, où grâce à une corde à nœud et un sablier de 28 secondes on pouvait connaître la vitesse du bateau. D'où l'unité de mesure de vitesse marine actuelle : le nœud marin. [14]

1.3.3. Combustion d'un corps

Dans la même optique que le sablier, il était nécessaire d'avoir quelques instruments pour mesurer les durées qui soient simples à mettre en œuvre, peu coûteux et de taille raisonnable. On réalisa dans les années 900 que l'incandescence d'un corps était constante. Aujourd'hui nous savons que ceci est faux, puisqu'elle dépend de la pureté du corps, de l'hygrométrie. Mais la précision de cette technique était suffisante pour connaître une durée. Elle avait de plus un double avantage, puisqu'elle permettait également d'éclairer



Figure1.14. Bougie

Ainsi différentes techniques apparaissent, bien sûr la bougie était la plus répandue en Europe. On utilisait aussi l'incandescence d'encens, ou de divers objets. Puis plus tard la lampe à huile avec réservoir graduée.[14]

1.3.4. L'horlogerie au service de la science

Les siècles suivants apportent son lot de scientifiques connus et reconnus encore aujourd'hui. Cette époque est également celle de nombreux théoriciens surtout en mécanique. Ceux-ci, dans leurs études ne pouvaient plus se contenter d'observer les phénomènes mais il fût question de les mesurer, parfois avec précision pour conclure à la viabilité d'une théorie. On rappellera que les scientifiques n'étaient pas nécessairement bien considérés à l'époque et que leurs résultats devaient être irréfutables par eux-mêmes, la communauté scientifique et la communauté religieuse qui voyait d'un mauvais œil qu'on s'intéresse à ce que leur Dieu avait façonné.

De nos jours, Le temps est mesuré avec une grande précision. Montres à quartz, chronomètres sont des instruments qui règlent notre vie quotidienne.[14]

La première horloge à quartz est apparue en 1933 avait l'allure d'un réfrigérateur tourné à l'horizontale. En 1968, la miniaturisation est telle qu'apparaît la première montre-bracelet à quartz. Elle est devenue numérique vers 1970.

Leur précision est dix fois plus grande que celle de meilleures montres mécaniques : elle « perd » 1 seconde tous les 6 ans.[14]



Figure 1.15.un cristal de quartz

1.4. Conclusion

On peut noter, à travers ce chapitre que le temps a toujours été un centre d'intérêt fascinant tant sur le plan humain que technique. C'est d'autant plus vrai dans notre civilisation, où le temps a pris une dimension importante dans la société.

Du point de vue de la société, la mesure du temps fut avant tout un moyen d'organisation à petite échelle, dans les périodes antiques, notamment pour l'agriculture avant de régir de façon drastique les lois du travail et des rapports humains. En effet, la révolution industrielle a modifié

complètement le mode de vie des êtres humains et leurs rapports au temps ainsi que sa mesure ont été des vecteurs essentiels. Il serait d'ailleurs intéressant de voir comment les civilisations actuelles se positionnent par rapport au temps. Certains prennent cette information comme une autre, d'autres la considère comme contrainte.

D'un point de vue purement technique, la mesure du temps a évolué selon les époques comme les autres concepts à ceci près que le besoin existe depuis très longtemps. Le cheminement des techniques est étroitement lié aux inventions de chaque époque. C'est ainsi qu'on retrouve des horlogers créant des machines à vapeur, l'horloger étant un mécanicien de précision, il a certainement appuyé d'autres révolutions. On notera toutefois que la solution technique a été trouvée par des scientifiques qui voulaient tester d'autres théories, comme Galilée. Ceci montre bien l'universalité du besoin scientifique de mesurer précisément le temps. C'est d'ailleurs dans ce besoin de mesure que réside aujourd'hui tout l'intérêt du progrès technique en matière de mesure du temps. La société possédant une base de temps à son échelle et n'en demandant pas une plus précise.

On notera, pour terminer ce chapitre, que les bouleversements se sont rapprochés les uns des autres, on peut donc certainement s'attendre à un bouleversement imminent dans les méthodes de mesure du temps, bien que celles-ci concerneront certainement les scientifiques avant peut être d'en bénéficier dans nos montres qui au passage sont autant des instruments de mode que des objets répondant au besoin initial.

Géométrie solaire

2.1. Introduction

La géométrie solaire est très important dans un n'importe quel Cadran solaire. En effet, le principe est de la connaissance de la trajectoire du soleil et sa position en chaque point du ciel est nécessaire pour une bonne poursuite, et pour la repérer il faut définir le système de coordonnées utilisées. Dans ce chapitre, nous donnons une brève présentation de la géométrie terre-soleil, les systèmes de coordonnées célestes et les techniques d'orientation d'une surface plus les différents types d'un cadran solaire.

2.2. La sphère céleste

Au-dessus d'un observateur terrestre, le ciel semble former une voûte qui a la forme d'une demi-sphère limité par l'horizon, la sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense avec la terre au centre. On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. Cette sphère est unique pour tous les habitants de la terre et son centre qui représente tous les lieux d'observation situés à la surface terrestre peut être confondu en toute logique avec le centre de la terre.

L'intersection de cette sphère avec l'axe de rotation de la terre (appelé aussi axe du monde) sont les deux pôles célestes : N le pôle Nord et S le pôle Sud. Le cercle (A) de cette sphère, perpendiculaire à l'axe des pôles est appelé : équateur céleste [15,16] (Figure 2.1).

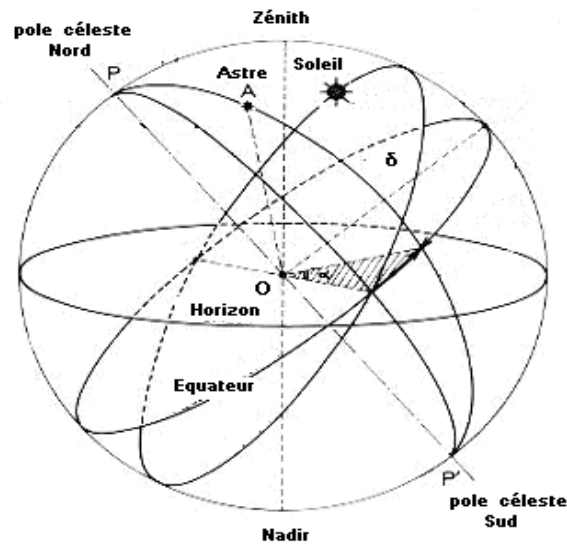


Figure 2.1 : La sphère céleste

2.3. Le soleil

Le Soleil est une sphère gazeuse de $1.392 \cdot 10^9 m$ de diamètre et est à distance moyenne de $149.6 \cdot 10^6 Km$ de la terre ; c'est une étoile résultant de la condensation d'un nuage interstellaire sous l'effet de la gravité. Ce type de nuage est essentiellement composé d'hydrogène, d'hélium, et dans une moindre mesure de carbone, d'azote et d'autres éléments. Le noyau du soleil ($400,000 Km$ de diamètre) à une température de l'ordre de $15 \cdot 10^6$ à $16 \cdot 10^6 K$ et agit comme un réacteur thermonucléaire. Les réactions de fusion nucléaire y transforment l'hydrogène en hélium en libérant $4 \cdot 10^9 Kg/s$ d'énergie de masse selon la célèbre équation d'Einstein $E = m \cdot c^2$ [17]

2.4. La terre

La terre est la troisième des planètes principales du système solaire dans l'ordre croissant des distances au soleil. Elle s'intercale entre Vénus et Mars. Elle tourne sur elle-même, d'un mouvement quasi uniforme, autour d'un axe passant par son centre de gravité (axe des pôles), tout en décrivant autour du soleil une orbite elliptique.

La révolution de la terre autour du soleil détermine la durée de l'année, et sa rotation sur elle-même celle du jour. Elle a la forme d'un ellipsoïde de révolution aplati. Son diamètre équatorial mesure $12\,756 Km$ environ et son diamètre polaire $12\,713 Km$. Sa superficie est de $510\,101 \cdot 10^3 Km^2$, son volume de $1\,083\,320 \cdot 10^6 Km^3$, sa masse de $5.98 \cdot 10^{24} Kg$ et sa densité moyenne est de 5.52 [18].

2.4.1. La distance terre-soleil

Le soleil est situé à une distance moyenne de 149 598 000 Km de la terre .Cette distance varie peu au cours de l'année ($\pm 1.65\%$), car l'excentricité de l'orbite terrestre est peu accentuée ($e = 0.017$). La relation suivante donne la variation en fonction du numéro de jour [19,20] :

$$D_{Ts}(N) = 1 - 0.017 \cos \left[\frac{360(N - 2)}{365} \right] \quad (1.1)$$

Où

N : est le numéro du jour compté à partir du 1^{er} janvier.(année civile: N=365 jours, année bissextile: N=366 jours)

La variation de la distance terre-soleil est représenté par la figure 2.1

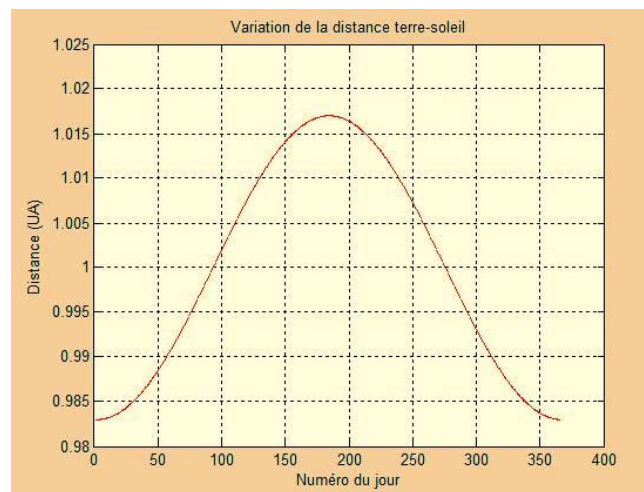


Figure 2.2: Variation de la distance terre-soleil au cours de l'année

Les valeurs extrêmes de la distance terre-soleil sont données respectivement:

$$D_{Ts}(MAX) = 1.017 \text{ UA} \quad \text{vers le 05 Juillet}$$

$$D_{Ts}(MIN) = 0.983 \text{ UA} \quad \text{vers le 02 Janvier}$$

2.4.2. Mouvement de la terre

Tout d'abord, il n'est pas inutile d'introduire quelques définitions :

Le terme « rotation » se réfère au mouvement d'un objet autour de son axe propre, tandis que le terme « révolution » se réfère au mouvement d'un centre de masse d'un objet autour d'un autre objet.

La rotation de la Terre autour de son axe par rapport aux étoiles a une période de 86164 secondes, soit 236s moins que le jour solaire moyen. Son inclinaison par rapport au plan de l'écliptique est de $23,45^\circ$ [21].

2.4.3. Mouvement de la terre autour du soleil

La terre parcourt son orbite elliptique autour du soleil en 365 jours, 6 heures, 9 minutes, dont le soleil est l'un des foyers. Du fait de l'excentricité de son orbite, sa vitesse varie entre 29.29 et 30.29 Km/s au cours de l'année. Les 6 heures, 9 minutes et quelques donnent un jour supplémentaire tous les quatre ans. Le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique. C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil, et au solstice d'été (22 juin) qu'elle en est la plus éloignée [15.21]

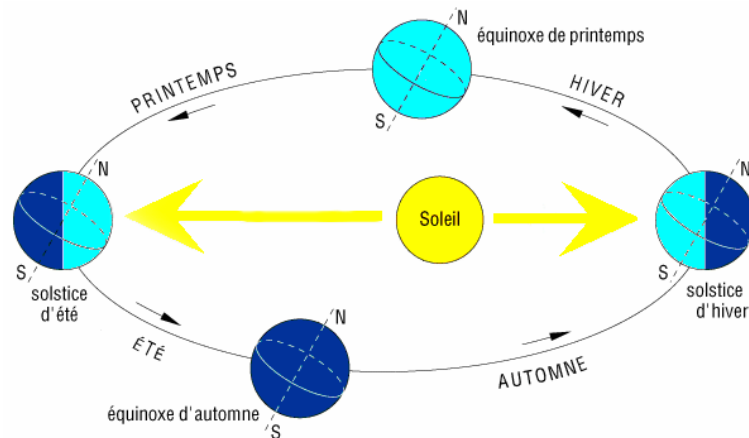


Figure 2.3: Représentation du mouvement de la terre autour du soleil

2.4.4. Mouvement apparent du soleil

Pour étudier le mouvement du soleil nous examinerons le mouvement apparent du soleil pour un observateur sur terre.

Le mouvement apparent du soleil observé d'un point quelconque de l'équateur est représenté sur la figure (2.3). Aux équinoxes, le soleil se lève à l'est, passe à la verticale à midi (heure solaire) et se couche à l'ouest. Entre le 21 mars et le 23 septembre, le soleil passe au nord de la verticale et pendant la deuxième moitié de l'année il passe au sud de la verticale.

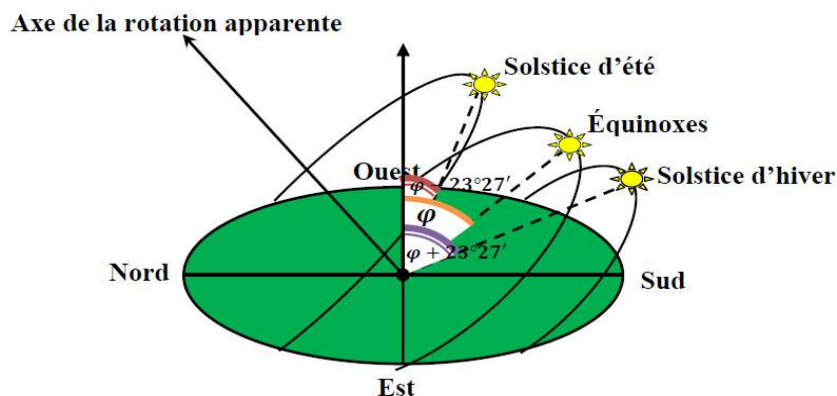


Figure 2.4 : Mouvement apparent du soleil

En un point de latitude φ au Nord de l'équateur est représenté sur la figure 2.4. On notera qu'aux équinoxes, le soleil décrit un arc de cercle de 180° dans la voûte céleste à raison de 15° par heure, ce qui donne des journées de 12 heures. Au midi solaire, l'angle que fait la direction du soleil avec l'axe vertical est égal à latitude du lieu φ .

Entre le 23 septembre et le 21 mars, ou plus particulièrement au solstice d'hiver, le 21 décembre, le soleil décrit dans la voûte céleste un arc de cercle inférieur à 180° . L'intersection du plan de rotation apparent du soleil avec le plan horizontal de l'observateur est une ligne parallèle à la direction Est-Ouest mais se trouvant vers le sud. Le soleil décrivant toujours un arc de 15° par heure. Au solstice d'été et plus généralement entre le 21 mars et le 23 septembre, le soleil décrit un arc de cercle supérieur à 180° .

L'angle que fait la direction du soleil avec le vertical du lieu est appelé « Distance Zénithale (ou angle zénithal) » noté θ_z . Elle varie quotidiennement et annuellement entre [20]:

$$\varphi - 23^\circ 27' \leq \theta_z \leq \varphi + 23^\circ 27'$$

- Aux équinoxes (EA et EP) $\rightarrow \theta_z = \varphi$, Les journées ont une durée de 12h.
- Au solstice hiver (SH) $\rightarrow \theta_z = \varphi + 23^\circ 27'$, Les journées ont une durée inférieure à 12h.
- Au solstice été (SE) $\rightarrow \theta_z = \varphi - 23^\circ 27'$, Les journées ont une durée supérieure à 12h.

En un point de l'équateur ($\varphi=0^\circ$), $\varphi - 23^\circ 27' \leq \theta_z \leq \varphi + 23^\circ 27'$, La durée des jours est de 12h = constante

En un point de l'attitude φ , le mouvement du soleil sera identique si on inverse les positions du sud et du nord.

2.5. Les systèmes de coordonnées

2.5.1. Les coordonnées géographiques

Les coordonnées géométriques utilisées pour déterminer la localisation d'un point sur la surface terrestre sont : la latitude, la longitude et l'altitude, qui sont calculées en angle et qui s'expriment en degrés, minutes et secondes (figure 2.5).

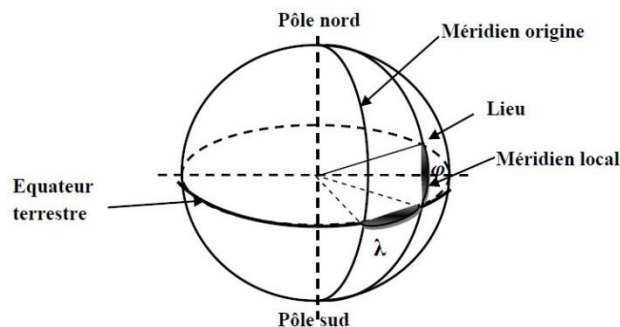


Figure 2.5. Coordonnées terrestres d'un lieu donné

a) Les parallèles

Ce sont des cercles concentriques qui découpent notre planète de l'équateur jusqu'aux pôles.

b) Les méridiens

Ce sont des cercles perpendiculaires à l'équateur, passant par les deux pôles déterminant une série de fuseaux.

c) La latitude φ

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré. Donne la localisation d'un point par rapport à l'équateur, elle varie de 0° à l'équateur à 90° Nord ou Sud aux pôles. Elle représente la distance angulaire du site S par rapport au plan de l'équateur [20].

$$-90^\circ \leq \varphi \leq +90^\circ \text{ Tel que : } \begin{cases} \varphi > 0 \text{ vers le Nord} \\ \varphi < 0 \text{ vers le Sud} \end{cases}$$

d) La longitude λ

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le méridien local passant par le point considéré avec le méridien d'origine passant par la ville de Greenwich [20].

$$-180^\circ \leq \lambda \leq +180^\circ \text{ Tel que : } \begin{cases} \lambda > 0 \text{ à l'est du méridien de Greenwich} \\ \lambda < 0 \text{ à l'ouest du méridien de Greenwich} \end{cases}$$

e) L'altitude

L'altitude est l'élévation d'un lieu par rapport au niveau de la mer, mesurée en mètre.

2.5.2. Les coordonnées de soleil

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents

- Par rapport au plan équatorial de la terre (repère équatorial).
- Par rapport au plan horizontal du lieu (repère horizontal).

2.5.2.1. Les coordonnées équatoriales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles (δ , ω).

a) La déclinaison δ

C'est l'angle formé par le vecteur Soleil-Terre avec le plan équatorial. Elle est due à l'inclinaison de l'axe des pôles terrestre par rapport au plan écliptique, ce qui est traduit par les différentes saisons. Elle varie au cours de l'année entre -23.45° et $+23.45^\circ$. Elle est nulle aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (23 septembre), et maximale aux solstices d'été (22 juin) et d'hiver (22 décembre).

La variation journalière de la déclinaison est d'environ de $0,5^\circ$. Elle est calculée par une équation simple approximative :

$$\delta(^{\circ}) = 23.45 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} (J + 284) \right] \quad (2.2)$$

Elle Varie entre deux valeurs extrêmes : $-23.45^\circ < \delta < +23.45^\circ$, cette formule donne la déclinaison en degrés, l'erreur sur δ est comprise dans l'intervalle $[-1,4^\circ; +0,5^\circ]$.

J est le rang du jour dans l'année (1 pour le 1er janvier).

Une autre formule approchée proposée par Chr. Perrin de Brichambaut [22]:

$$\delta(^{\circ}) = \arcsin \left[0.4 \cdot \sin \left(\frac{360}{365} (J + 80) \right) \right] \quad (2.3)$$

L'erreur sur δ est comprise dans l'intervalle $[-1,9^\circ; +0,8^\circ]$.

Une de ces deux formules fait l'affaire pour les calculs d'énergétique de précision moyenne.

Pour plus de précision, on peut facilement ajuster une fonction périodique composée de la somme de deux (ou plus si le besoin de précision le justifie) fonctions sinusoïdales et d'un terme constant sur les données calculées (à quelques 10^{-4} secondes d'arc près) par le Bureau des Longitudes. Par exemple, pour la période 2013 - 2023, on trouve en degrés :

$$\delta(^{\circ}) = 0.38 + 23.26 \cdot \sin \left(\frac{2\pi J'}{365.24} - 1.395 \right) + 0.375 \cdot \sin \left(\frac{4\pi J'}{365.24} - 1.47 \right) \quad (2.4)$$

J' Vaut 1 au premier janvier 2013, 366 au premier janvier 2014, 731 au premier janvier 2015, 1096 au premier janvier 2016, 1462 au premier janvier 2017, etc... On a tenu compte du fait que 2016 sera une année bissextile. Cette fonction est comparée avec les calculs du bureau des longitudes. L'erreur, non décelable à l'échelle du graphique, reste toujours inférieure à $0,20^\circ$ ($11,8'$). Un développement avec des termes supplémentaires permettrait de réduire encore l'erreur résiduelle [22]

La variation de la déclinaison du soleil au cours de l'année est représentée par la figure 2.6

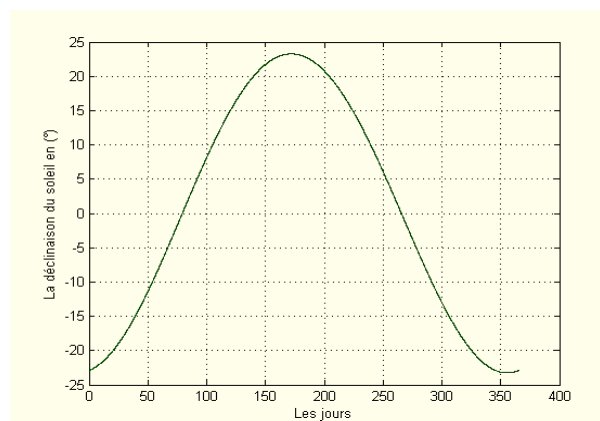


Figure 2.6 : Variation annuelle de la déclinaison solaire

b) L'angle horaire ω

C'est l'angle que font les projections de la direction du soleil avec la direction du méridien du lieu, l'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation [20]:

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (2.5.)$$

où

TSV est le temps solaire vrai (en heures) qui est égal au temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi et se calcule par la formule suivante:

$$TSV = GMT + \left(\frac{ET}{60}\right) + \left(\frac{\lambda - \lambda_{réf}}{15}\right) \quad (2.6)$$

$$ET = \{0.000075 + 0.00186 \cos(B) - 0.032077 \sin(B) - 0.014615 \cos(2B) - 0.04089 \sin(2B)\} 229.18 \quad (2.7)$$

$$B = \left(\frac{360}{365}(Nj - 1)\right) \quad (2.8)$$

ET: est l'équation du temps

GMT: est le temps universel du méridien de Greenwich.

ET: est l'équation du temps en minute.

λ : est la longitude du lieu.

$\lambda_{réf}$: est la longitude du méridien de Greenwich, il est égal à 0.

Avec TSV en heures et l'angle horaire ω varie de -180° à $+180^\circ$.

Cette formule provient du fait que le soleil semble tourner dans le plan de l'équateur de 360° en 24 heures soit 15° par heure. De plus, le choix arbitraire de prendre l'angle horaire nul quand le soleil est dans le plan du méridien local (il est alors midi solaire) finit d'expliquer la formule.

$$\begin{cases} \omega > 0 & \text{après midi (PM)} \\ \omega < 0 & \text{avant midi (AM)} \\ \omega = 0 & \text{midi TSV} \end{cases}$$

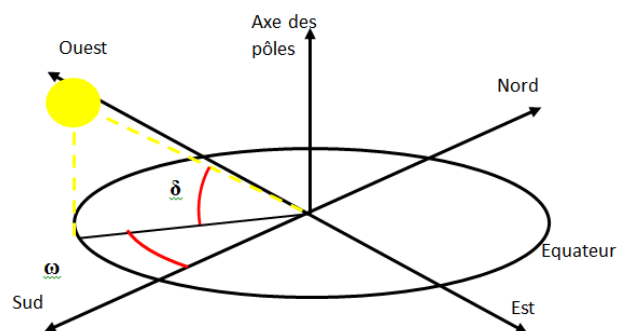


Figure 2.7. Coordonnées équatoriales

2.5.2.2 Les coordonnées horizontales ou azimutales

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan horizontal du lieu de latitude φ par deux angles h et Ψ .

a) Hauteur angulaire du soleil h

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante [20] :

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta) \quad (2.9)$$

Varie entre deux valeurs extrêmes : $-90^\circ < \alpha < +90^\circ$,

$$\begin{cases} h > 0 & \text{le jour} \\ h < 0 & \text{la nuit} \\ h = 0 & \text{au lever et coucher du soleil} \end{cases}$$

b) Azimut du soleil Ψ

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du Sud. L'azimut du soleil varie à chaque instant de la journée [8].

$$\Psi = \arcsin\left(\frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)}\right) \quad (2.10)$$

Ψ varie entre : -180° et $+180^\circ$,

$$\begin{cases} \Psi > 0 & \text{vers l'ouest} \\ \Psi < 0 & \text{vers l'est} \\ \Psi = 0 & \text{direction du sud} \end{cases}$$

c) Angle zénithal θ_z

C'est l'angle entre la verticale d'une surface est un rayon du soleil, il est donné par l'équation suivante [20]:

$$\theta_z = \cos^{-1}[\sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)] \quad (2.11)$$

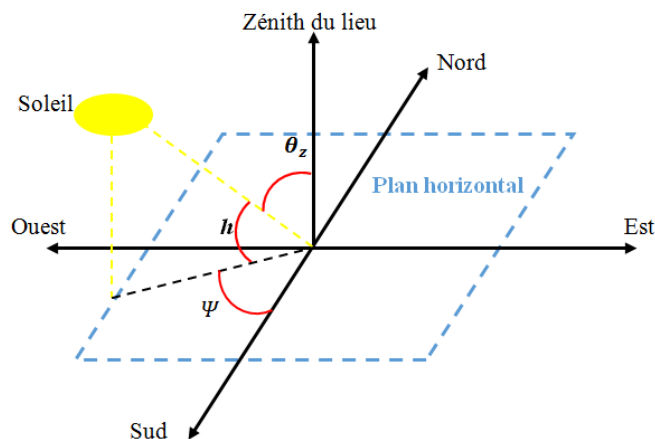


Figure 2.8. Cordonnées horizontales

2.5.3. Récapitulatif des angles utilisés

Repère	Angles	Dénomination
Les coordonnées géographiques	Φ	Latitude
	Λ	Longitude
Les coordonnées horaires	Δ	La déclinaison du soleil
	Ω	L'angle horaire
Les coordonnées horizontales	H	La hauteur angulaire du soleil
	Ψ	L'azimut du soleil

Tableau 2.1. Angles utilisés

2.5.4. La durée du jour

Le jour est le temps qui sépare le lever et le coucher du soleil. Deux instants particuliers de la journée qui donne une hauteur h du soleil nulle sont appelés: le lever et le coucher du soleil.

L'angle de lever du soleil est donné par la formule suivante:

$$\omega_{sr} = -\text{acos}(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)) \quad (2.12)$$

L'heure de lever de soleil est donnée par la formule suivante:

$$H_L = \left(\frac{1}{15}\right) \cdot \omega_{sr} + 12 \quad (2.13)$$

L'angle de coucher du soleil est donné par la formule suivante:

$$\omega_{ss} = -\omega_{sr} = \text{acos}(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)) \quad (2.14)$$

L'heure de coucher de soleil est donnée par la formule suivante :

$$H_C = \left(\frac{1}{15}\right) \cdot \omega_{ss} + 12 \quad (2.15)$$

La durée du jour T_j est calculée à partir du lever jusqu'au coucher du soleil, c'est-à-dire:

$$T_j = H_C - H_L \quad (2.16)$$

ou encore

$$T_j = \left(\frac{2}{15}\right) \cdot \text{acos}(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)) \quad (2.17)$$

T_j : est la durée du jour exprimée en heures, précision meilleure que 4%.

Une formule rigoureusement équivalente [22] :

$$T_j = 24 \left[1 - \frac{\arccos(\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta))}{\pi} \right] \quad (2.17)$$

2.6. Formules de calcul de la position du soleil par rapport à une face quelconque

2.6.1. Calcul des coordonnées solaires

La déclinaison solaire δ varie selon un cycle de quatre ans. On peut calculer sa valeur moyenne par les formules suivantes:

$$\delta = 0.33281 - 22.984 \cos J' - 0.34990 \cos 2J' - 0.13980 \cos 3J' + 3.7872 \sin J' + 0.03205 \sin 2J' + 0.07187 \sin 3J' \quad (\text{en deg.}) \quad (2.18)$$

$$\delta = 0.40928 \times \frac{\sin 2\pi}{365} (284 + j) \quad (\text{en rad}) \quad (2.18)$$

Où j est le numéro d'ordre du jour considéré dans l'année à partir du premier janvier ($j=1, \dots, 365$) et $j' = 360^\circ j / 365,25$. [23]

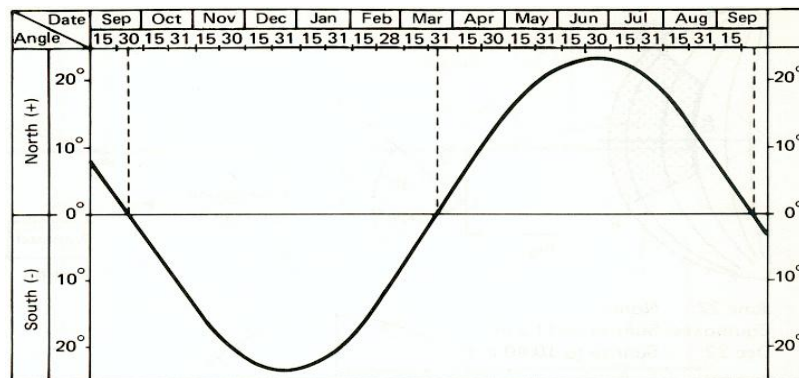


Figure 2.9. Déclinaison selon la date.

La hauteur du soleil γ est donnée par la formule suivante :

$$\sin \gamma = \sin \phi \times \sin \delta + \cos \phi \times \cos \delta \times \cos \omega \quad (2.19) \quad \begin{matrix} \text{Où} \\ \phi \end{matrix}$$

est égal à la latitude du lieu, δ à la déclinaison du soleil le jour considéré et ω l'angle en radian correspondant à l'heure solaire du jour considérée (varie entre -12 et $+12 \times \pi/12$).

L'azimut du soleil, α_s , mesuré par rapport au sud, est donné par:

$$\cos \alpha s = (\sin \emptyset \times \sin \gamma - \sin \delta) / (\cos \emptyset \times \cos \gamma) \quad (2.20)$$

2.6.2. Angle d'incidence du faisceau solaire sur une surface

Pour une surface orientée selon un angle horizontal α par rapport au sud et une pente β par rapport à l'horizontale, l'angle d'incidence v du faisceau solaire, mesuré par rapport à la normale de la face est donné par:

$$\cos v = \cos \beta \sin \gamma + \sin \beta \cos \gamma \cos(\alpha - \alpha s) \quad (2.21)$$

Ces différentes formules vont donc permettre de calculer la position du soleil, par rapport à une face orientée de manière quelconque, pour une heure et un jour donné à une latitude donnée. [23]

2.7. Diagramme stéréographique pour une latitude donnée

Le diagramme stéréographique d'une latitude donnée résulte de la superposition de deux séries de courbes.

- Les courbes du parcours solaire pour l'équinoxe, les deux solstices et les autres mois de l'année. Il faut remarquer à ce propos que, dans la mesure où le parcours de la terre par rapport au soleil est symétrique, à chaque courbe correspondent deux dates de l'année, l'une située entre décembre et juin, l'autre située entre juin et décembre.

- Une série de cercles concentriques représente l'altitude angulaire en projection stéréographique. Il est important de souligner que ces courbes ne sont pas également espacées étant donné que la projection stéréographique n'est pas équidistante.

On trace également sur les chemins solaires des lignes horaires. Toutes ces heures sont en temps solaire vrai, c'est-à-dire correspondant au temps pour lequel le soleil est au sud vrai à midi (pour l'hémisphère nord).

On définira un ensemble dual pour l'autre hémisphère.

La position du soleil peut être obtenue directement à partir du diagramme pour un moment donné de l'année. Il suffit en effet

- de trouver le graphe correspondant à la latitude du lieu,
- de localiser la date et l'heure sur les chemins solaires, en interpolant si nécessaire entre les courbes,
- de lire les angles, horizontal et vertical, sur le graphe.[23]

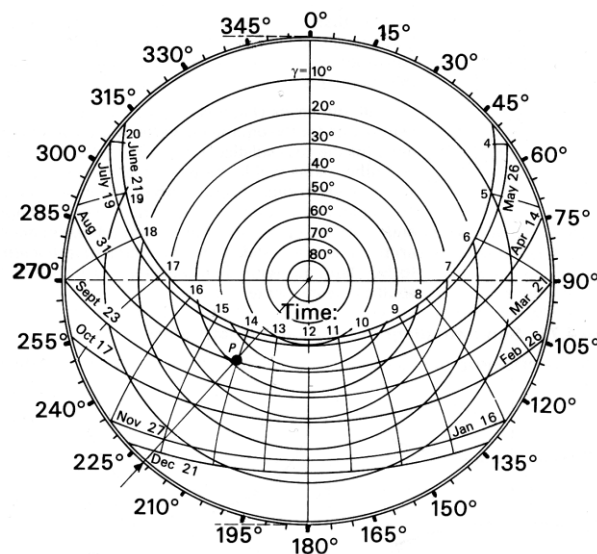


Figure 2.10. Lecture de l'azimut et de l'altitude angulaire, pour le 31 août à 14h, $\alpha = 222^\circ$, $\gamma = 42^\circ$ [23]

2.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, en premier lieu, l'aspect géométrique du soleil. Nous avons démontré la nature de relation physique qui existe entre notre planète (la terre) et cette source d'énergie inépuisable (le soleil), on parle de la variation journalière (jour/nuit) et saisonnière (printemps, été, automne, et hiver). Ensuite, on s'est concentré sur les représentations existantes de ce mouvement nommé trajectoire solaire. On a vu que la trajectoire solaire peut être tracée sur une sphère céleste locale à l'aide de deux angles : l'altitude et l'azimut qui changent en fonction de deux paramètres : temporaire (heure, jour et mois) et spatial (latitude du lieu). La connaissance

de la position du soleil dans le ciel à tout instant est nécessaire pour bien comprendre la façon qu'influence le soleil sur le choix et le traitement d'un site.

Cette information est indispensable pour le choix d'un cadran solaires et leur l'emplacement, La représentation graphique de la course du soleil constitue un moyen pratique pour repérer le trajet du soleil à travers le ciel. Cette représentation peut être réalisée à l'aide de plusieurs outils, à savoir, les cadrans solaires et les gnomons

Cadran solaires

Résumé

Dans ce chapitre, nous expliquons et présentons différents types de cadrans solaires et comment tracer-les par des systèmes de coordonnées horizontal, équatorial.

3.1. Cadran Solaires et leur principe

Le principe du cadran solaire repose sur la projection de l'ombre d'une tige (appelée style) sur un support gradué. Le Soleil effectuant une révolution apparente toutes les 24 heures (c'est évidemment la Terre qui tourne sur elle-même), il est possible de mesurer l'angle horaire du Soleil et de retrouver l'heure solaire vraie, ou par le biais de corrections, l'heure légale. Il est possible de construire des cadrans sur tout type de support plan ou non. Les cadrans non plans sont assez rares et très difficiles à construire. Les cadrans plans sont aussi variés que l'orientation et l'inclinaison du support. Les plus courants sont les cadrans horizontaux (placés souvent sur des colonnes dans les jardins) et les cadrans verticaux méridionaux (à la façade des maisons et églises).

- La science des cadrans solaires s'appelle la gnomonique, à ne pas confondre avec la gnomique en dépit de leur étymologie commune.

Au-delà de l'aspect mesure du temps (qui de toute façon ne peut pas lutter face aux montres modernes), le cadran solaire doit se caractériser par un graphisme et une décoration originale. Le cadran égaye les façades et les jardins et certains cadrans sont de véritables œuvres d'art.

La devise associée au cadran lui donne sa personnalité. Sur les cadrans modernes, elle est moins souvent en latin mais toujours empreinte de philosophie. Elle peut être tirée d'une œuvre littéraire ou former une maxime sentencieuse. [24]

Les cadrans verticaux sont souvent peints sur les façades. La région du sud des Alpes en fourmille, dont certains sont très bien conservés ou restaurés. La technique doit être sûre pour résister aux outrages du temps. Plus aisé à réaliser, le cadran sur bois ou sur métal a l'avantage de pouvoir être préparé dans un autre lieu que son lieu d'installation.

Quoi qu'il en soit, le cadran solaire est source de plaisirs artistiques, scientifiques et historiques.

Pour la compréhension il n'y a pas de différence fondamentale entre un cadran vertical et un cadran horizontal. Seul le calcul est compliqué pour le cadran vertical du fait qu'il faille introduire un paramètre supplémentaire : la déclinaison gnomonique qui est, comme cela est expliqué dans les définitions, l'inclinaison du plan de lecture sur le méridien du lieu. L'angle noté « λ » est relatif à la latitude du lieu :

- Pour un cadran vertical : $\lambda = \text{latitude}$
- Pour un cadran horizontal : $\lambda = 90^\circ - \text{latitude}$ (encore appelé Co-latitude).

A titre d'exemple, la figure 3.1 illustre un cadran vertical méridional:

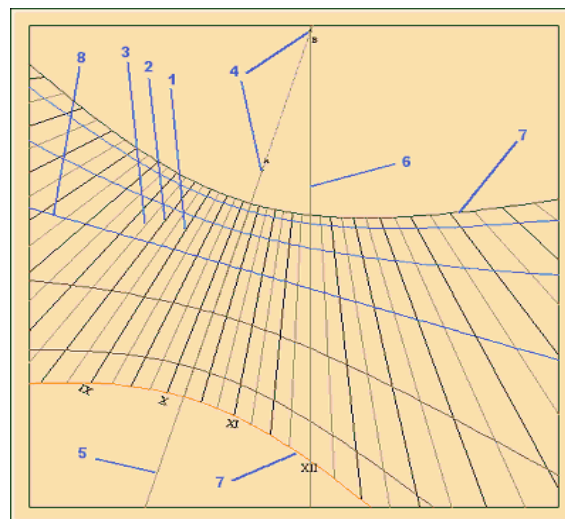


Figure 3.1.exemple d'un cadran vertical méridional [24]

- *Les lignes droites sont appelées les lignes horaires* : Elles permettent de connaître l'heure à partir de l'ombre du style. Certaines lignes donnent l'heure pleine (1), la demi-heure (2) ou le quart d'heure (3) ou même toutes les cinq minutes.
- *Le style (4) est formé de deux parties* : le style droit planté en A et le style polaire planté en B. La ligne passant par ces deux points s'appelle la ligne **sous-style** (5).
- **La ligne horaire** correspondant au midi solaire est la droite de plus grande pente (6). Elle correspond à l'intersection du méridien du lieu avec la table du cadran.

- Selon la saison, l'ombre est plus ou moins longue et éloignée du point B, en fonction de la déclinaison du soleil. On repère les moments remarquables comme les solstices (7) et les équinoxes (8). Les autres courbes intermédiaires sont les courbes de déclinaison.

On distingue deux grandes catégories de cadrans :

- Les cadrans solaires qui fournissent un certain nombre d'heures en fonction de leur orientation.
- les méridiennes qui indiquent uniquement l'heure de midi. C'est un cadran ne comportant que la ligne de 12h. Dans ce cas le style possède une plaque percée d'un trou et qui fournit sur une zone d'ombre une image nette du Soleil. Ce type de cadran servait à mettre les pendules à l'heure solaire. Su ce croquis figure la courbe de temps moyen.

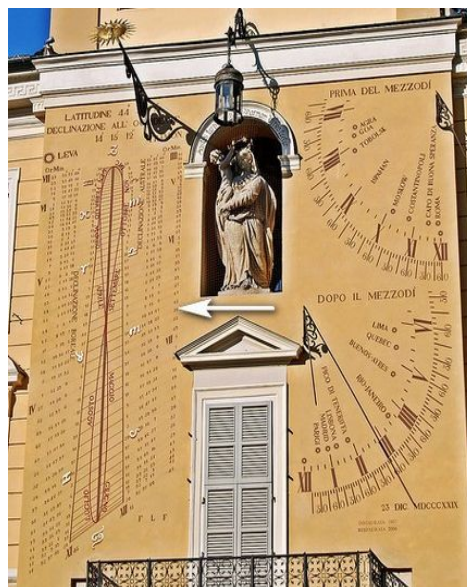


Figure 3.2. Méridiennes [25]

L'orientation du cadran et sa forme sont deux paramètres essentiels à la construction de celui-ci.

Le cadran solaire comprend:

- le **style** qui est un objet dont le rôle est de porter l'ombre du Soleil; le style étant toujours parallèle à l'axe de rotation de la Terre (ou axe du monde), celui-ci est orienté vers le pôle céleste (Nord ou Sud selon l'hémisphère) et forme avec le plan d'un cadran horizontal un angle égal à la latitude du lieu.
- la **table** constituée d'une surface sur laquelle sont tracées les lignes horaires; les différents types de cadrans solaires dépendent de l'orientation de la table par rapport à l'axe de rotation de la Terre.

- le **centre** est le point de la table vers lequel convergent les lignes horaires et où est généralement implanté le style.

La méridienne est également constituée d'un style fixé sur une table pour indiquer essentiellement l'heure de midi; il se peut que soit indiquée l'heure avant et après midi. La méridienne peut être horizontale ou verticale.[26]

3.2. Différents types du cadran solaire

3.2.1. Cadran équatorial

Le style du cadran équatorial est orienté parallèlement à l'axe de rotation de la terre et forme un angle avec le plan horizontal égal à la latitude du lieu. La table est constituée d'un cercle perpendiculaire au style qu'il traverse en son milieu, telle une roue, les lignes horaires sont donc des rayons espacés les uns des autres de 15° , correspondant à une heure solaire.

Ce type de cadran a l'avantage d'être simple de construction car il ne nécessite aucun calcul; seule une orientation soignée garantira l'exactitude des résultats. Tous les autres types de cadrans sont issus du cadran équatorial par projection.[26]

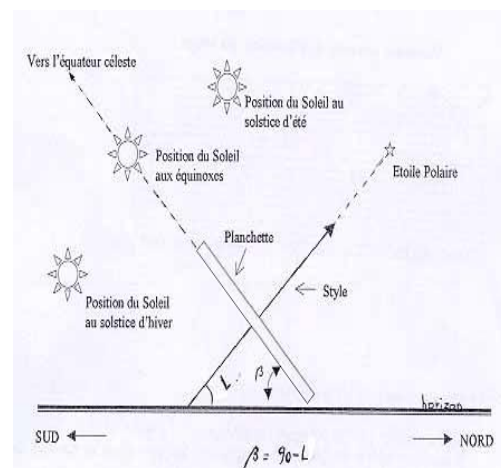


Figure 3.3. Cadran équatorial [26]

Ce cadran s'appelle ainsi car sa table est parallèle à l'équateur. Sous les latitudes plus élevées comme la nôtre celle-ci est inclinée. Ce cadran comporte 2 faces, en effet, le soleil restant 6 mois au-dessus de l'équateur et 6 mois dessous, la face supérieure est éclairée au printemps et en été, la face inférieure est éclairée en automne et en hiver. Le jour de l'équinoxe de printemps et d'automne les 2 faces sont éclairées simultanément, le Soleil étant situé dans le plan de la table.[27]

3.2.2. Cadran horizontal

Les divisions horaires et les chiffres sont tracés sur un plan horizontal, c'est à dire parallèle à l'horizon du lieu. Les lignes horaires sont symétriques par rapport à la ligne de midi (méridien). Le style orienté au pôle, fait un angle avec la table égal à la latitude du lieu. On trouve généralement ce type de cadran dans les jardins où il est aisé de réserver une surface plane et horizontale (console, terrasse, etc.)

Ce type de cadran est un des plus faciles à construire. [26]



Figure 3.4. Cadran Solaire horizontal [28]

3.2.3. Le cadran vertical

On distingue trois types de cadran vertical:

3.2.3.1. Le cadran canonial

Le cadran canonial est un cadran généralement construit sans avoir respecter de règles précises de calcul et dont le but était davantage de rythmer les offices religieux plutôt que de donner l'heure. C'est pourquoi on les trouve souvent gravés sur le mur des églises. Ce type de cadran est caractérisé par son style droit qui est fixé perpendiculairement à la surface sur laquelle le cadran est fixé. [26]



Figure 3.5. Adolescent au cadran «Cadran canonial de la cathédrale de Strasbourg demi-cercle », 7 lignes horaires [29]

3.2.3.2. Cadran vertical méridional ou non déclinant

Ce type de cadran demande que la table soit parfaitement orientée au Sud; cela signifie que la table est verticale et que le plan est perpendiculaire au méridien. Cette contrainte explique que certains cadrans de ce type sont encastrés dans un mur ou un pignon qui n'est pas orienté plein Sud. Le style est dirigé vers le pôle et fait un angle de 90° moins la latitude du lieu avec la table. Les lignes horaires sont disposées symétriquement par rapport à la ligne de midi. Sur ce type de cadran, l'horizontale passant par le centre indique 6 H le matin et 18 H l'après-midi.

a) Limites de fonctionnement

La table du cadran méridional est éclairée dès que le Soleil est au-dessus de l'horizon et au sud (au nord) de la ligne Est-Ouest. Cependant, si le cadran est installé sous les tropiques, il y aura une période de l'année où le Soleil éclairera par moment l'autre face du mur et pas le cadran, puisque la déclinaison du Soleil peut dépasser 90° .

Lorsque le Soleil est au plus haut dans le ciel (au solstice d'été) l'ombre est la plus longue et la plus éloignée de la base du style. A l'inverse, en hiver, les ombres sont courtes et leur extrémité proche de la base du style.

b) Construction

Les tables de coordonnées donnent la position des extrémités des segments de droite horaire pour les solstices, ainsi que l'angle de la droite. Les coordonnées des points composant les lignes de déclinaison sont données en cartésien (x et y en millimètres) et en polaire (rayon en millimètres et angle en degrés). Les coordonnées cartésiennes sont données en millimètres par rapport au point A du style, l'axe x étant orienté vers la droite et l'axe y vers le haut. Les coordonnées polaires (rayon et angle) sont données en millimètres et en degrés, par rapport au point B du style, dans le sens trigonométrique.

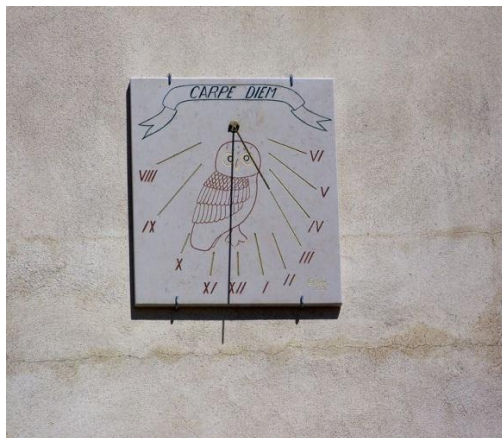


Figure 3.6. Cadran Vertical méridional et cadran Solaire méridional Ankara (Turquie) [25]

3.2.3.3. Le cadran vertical déclinant

Le principe de ce cadran est le même que celui ci-dessus excepté que la table ne fait plus face au Sud, c'est pourquoi il est dit déclinant et l'angle qu'il fait avec la ligne Est/Ouest s'appelle déclinaison. Sa construction est plus complexe que les cadrans précédents et il faut connaître précisément l'inclinaison du mur ou du support du cadran pour déterminer la position des lignes horaires.

Le style des cadrans du matin est placé à gauche de la ligne de midi et à droite pour les cadrans du soir. Les lignes horaires ne sont plus symétriques par rapport à midi et ceci est d'autant plus marqué que l'inclinaison est grande.

Le cadran vertical déclinant représente tous les états intermédiaires entre le cadran oriental et le cadran occidental, en passant par le cadran méridional et le cadran septentrional. Il convient pour tous les murs verticaux ; On mesure la déclinaison du mur par rapport au méridien. Un azimut de 0° donnera un cadran méridional. Un azimut de 90° Est donnera un cadran

oriental. Enfin, un azimut de 180° donnera un cadran septentrional faisant face au pôle nord (au pôle sud dans l'hémisphère sud).

Le cadran vertical déclinant donne des lignes très intéressantes pour un azimut de 20 à 60° . [30]

a) Limites de fonctionnement

La table du cadran déclinant est éclairée dès que le Soleil est au-dessus de l'horizon et qu'il passe dans le demi-cercle centré sur la déclinaison gnomonique du mur ($d-90^\circ$ à $d+90^\circ$). Un cadran septentrional sera éclairé un peu le matin et un peu le soir mais pas durant la journée. En hiver, il se peut même qu'il ne soit pas éclairé de toute la journée.

b) Construction

Les tables de coordonnées donnent la position des extrémités des lignes horaires pour les solstices, ainsi que l'angle de la droite. Les coordonnées des points composant les lignes de déclinaison sont données en cartésien (x et y en millimètres) et en polaire (rayon en millimètres et angle en degrés). [30]

Les coordonnées cartésiennes sont données en millimètres par rapport au point A du style, l'axe x étant orienté vers la droite et l'axe y vers le haut. Les coordonnées polaires (rayon et angle) sont données en millimètres et en degrés, par rapport au point B du style, dans le sens trigonométrique.

Pour des cadrans déclinants où le point B est rejeté très loin, les coordonnées polaires ne sont plus données. [30]

c) Installation

La déclinaison du mur doit être mesurée avec précision. Le style doit également être installé avec soin pour garantir le bon fonctionnement du cadran.

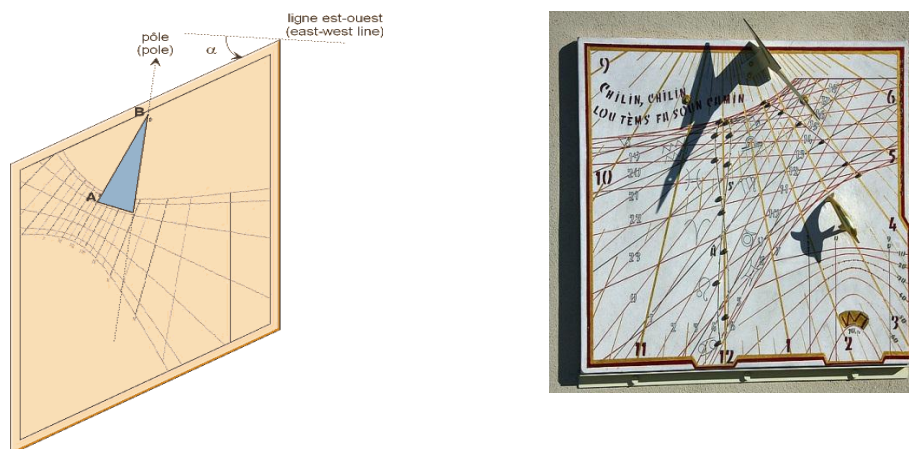


Figure 3.7. Cadran vertical déclinant d'environ 60° -Est et cadran solaire vertical déclinant en pierre de Lens [30,31]

Lorsque la déclinaison gnomonique est supérieure à 90° , le cadran est dit septentrional et le style commence à pointer vers le haut en direction du pôle. Pour un cadran faisant face au pôle, le style est dirigé en l'air, à l'opposé du style d'un cadran méridional.

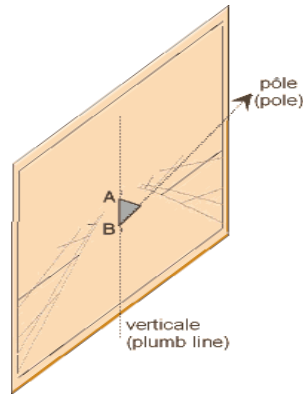


Figure 3.8. Cadran vertical septentrional déclinant de 180° [30]

3.2.3.4. Cadran déclinant vers le sud-est ou le sud-ouest

Lorsque le mur n'est plus orienté face au sud, le côté gauche n'est plus symétrique de celui de droite. Nous devons faire intervenir dans les calculs l'orientation du mur appelé déclinaison gnomonique.

Un cadran méridional a une déclinaison de 0° , un cadran de -10° est dit déclinant sud-est de 10° , un cadran de $+25^\circ$ est dit déclinant sud-ouest de 25° etc.

L'inclinaison du style est déterminée par le calcul ainsi que sa position par rapport à la ligne de 12h. Un cadran déclinant sud-est verra son style orienté vers la gauche du cadran et un sud-ouest vers la droite de x degrés.[27]

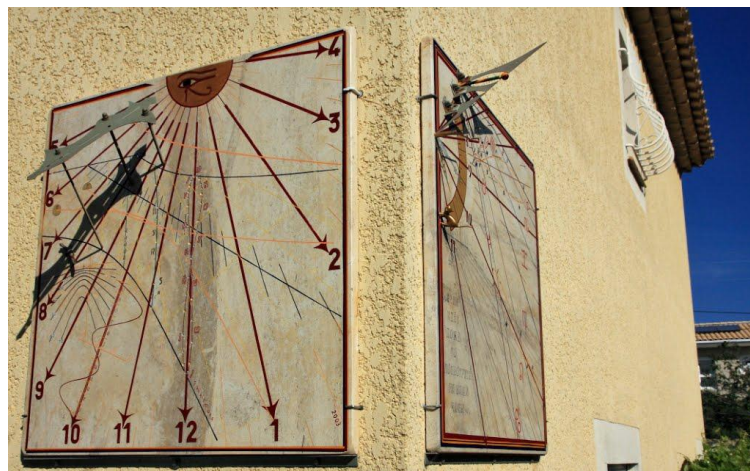


Figure 3.9. Cadran déclinant à style multi indicateur et cadran septentrional à St Mitre Château-Gombert [32]

3.2.3.5. Cadran septentrional ou «plein nord»

Au contraire de ce que l'on pourrait penser, un cadran solaire orienté au nord est possible. Ce type de cadran ne fonctionne que du lever du Soleil jusqu'à 6h du matin et de 18h au coucher du Soleil, et ce passé l'équinoxe de printemps jusqu'à l'équinoxe d'automne.

La durée de fonctionnement ira en s'accroissant jusqu'à atteindre son maximum au solstice d'été puisque les jours y sont les plus longs.

La pointe du style au lieu d'être orientée vers le bas remonte vers le haut. Le lever et le coucher du Soleil dépendent de la latitude, ici le cadran est pour une latitude de 49° . [27]



Figure 3.10. Un cadran septentrional aux Cabanes de Fleury par Jean Pakhomoff [33]

3.2.3.6. Cadran déclinant nord-est, nord-ouest

La déclinaison du mur est dans ce cas supérieure à $+90^\circ$ et inférieure à 180° pour un cadran nord-ouest et inférieure à -90° et inférieure à -180° . Le style a comme pour le cadran septentrional son extrémité orientée vers le haut. La ligne horaire de 12h ne peut s'y trouver.

2.3.6.1. Cadran déclinant nord-est

Les lignes horaires indiquent l'heure avant 6h et jusqu'à l'heure du lever du soleil selon la déclinaison et jusqu'à 1 minute avant 12h, tout cela étant déterminé par les calculs. [27]

3.2.3.6.2. Cadran déclinant nord-ouest

Les lignes horaires indiquent l'heure à partir de 1 minute après 12h et jusqu'au coucher du Soleil selon la déclinaison.

3.2.3.7. Le cadran oriental ou occidental

Ils sont dérivés du cadran vertical déclinant puisque leur table fait un angle de 90° avec le Sud; c'est donc un cadran du matin (oriental) ou bien de l'après-midi (occidental). Comme le cadran polaire, le

style est parallèle à l'axe de la table et les lignes horaires sont parallèles entre elles: en revanche, la table est placée verticalement. Le cadran oriental peut indiquer les heures avant 6 H mais l'ombre du style disparaît avant midi et l'ombre du cadran occidental apparaît après-midi et peut indiquer les heures après 18h.

Il est à noter que si la déclinaison dépasse 90° , les lignes horaires ne sont plus parallèles et sont dans ce cas placées au-dessus du centre: dirigé vers le Nord, ce cadran peut indiquer les heures de l'aube et du crépuscule, mais seulement l'été sous nos latitudes.[27]

3.2.3.7.1. Cadran occidental

a) Limites de fonctionnement

La table du cadran occidental est éclairée à partir du passage du Soleil au méridien jusqu'à son coucher. Peu après le passage au méridien, l'ombre du style est rasante et de grande longueur ; la précision du cadran est alors en général médiocre.[34]

b) Construction

On construit en général un style rectangulaire peu large, avec une encoche au centre pour repérer la position de l'ombre sur les lignes de déclinaison. Il est également possible de n'avoir qu'une tige perpendiculaire plantée au point A. Les points B et C sont déterminés par la longueur tronquée de la base du style (voir la boîte de dialogue des dimensions).

Les tables de coordonnées donnent la position des extrémités des segments de droite horaire pour les solstices. Les coordonnées des points composant les lignes de déclinaison sont données en cartésien (x et y en millimètres) et en polaire (rayon en millimètres et angle en degrés).

Les coordonnées cartésiennes sont données en millimètres par rapport au point A du style, l'axe x étant orienté vers la droite et l'axe y vers le haut. Les coordonnées polaires (rayon et angle) sont données en millimètres et en degrés, par rapport au point A du style (contrairement aux autres cadrans), dans le sens trigonométrique. [34]

c) Installation

Le cadran doit être placé sur un mur vertical, faisant face à l'ouest. Le style doit être parallèle à l'axe de la Terre :

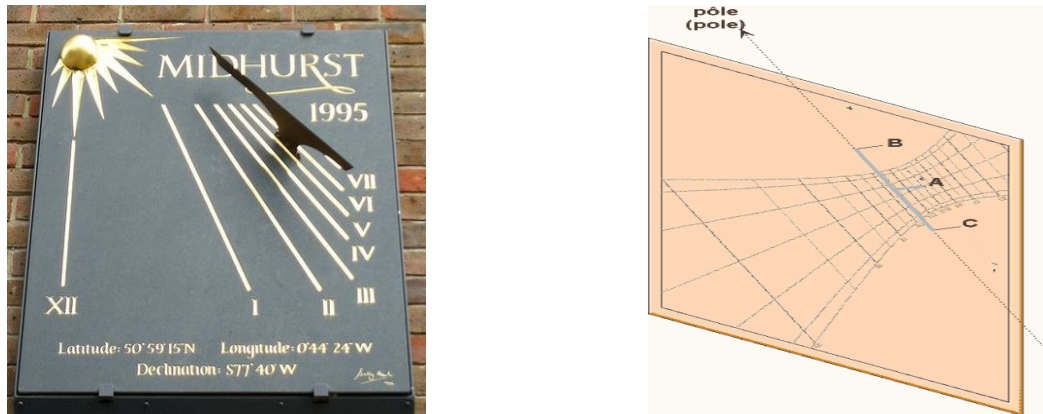


Figure 3.11. Cadran occidental Latitude 50°59'15"N Longitude 0°44'24"W [34]

Ce type de cadran est orienté plein ouest, la déclinaison du mur est alors de $+90^\circ$. Son aspect diffère totalement du cadran méridional, les lignes horaires sont parallèles et le style est placé sur la ligne de 18h. La ligne de 12h n'y figure pas car elle est rejetée à l'infini, les rayons du Soleil rasant le mur. Le cadran est éclairé de 12h au coucher du Soleil.[34]

3.2.3.7.2. Cadran oriental

a) Limites de fonctionnement

La table du cadran oriental est éclairée du lever du Soleil jusqu'à son passage au méridien. A l'approche du passage au méridien, l'ombre du style devient rasante et son extrémité s'éloigne à l'infini ; la précision du cadran est alors en général médiocre.[35]

b)-Construction

On construit en général un style rectangulaire peu large, avec une encoche au centre pour repérer la position de l'ombre sur les lignes de déclinaison. Il est également possible de n'avoir qu'une tige perpendiculaire plantée au point A. Les points B et C sont déterminés par la longueur tronquée de la base du style (voir la boîte de dialogue des dimensions).

Les tables de coordonnées donnent la position des extrémités des segments de droite horaire pour les solstices. Les coordonnées des points composant les lignes de déclinaison sont données en cartésien (x et y en millimètres) et en polaire (rayon en millimètres et angle en degrés).

Les coordonnées cartésiennes sont données en millimètres par rapport au point A du style, l'axe x étant orienté vers la droite et l'axe y vers le haut. Les coordonnées polaires (rayon et

angle) sont données en millimètres et en degrés, par rapport au point A du style (contrairement aux autres cadrans), dans le sens trigonométrique.[35]

c) Installation

Le cadran doit être placé sur un mur vertical, faisant face à l'Est. Le style doit être parallèle à l'axe de la Terre :

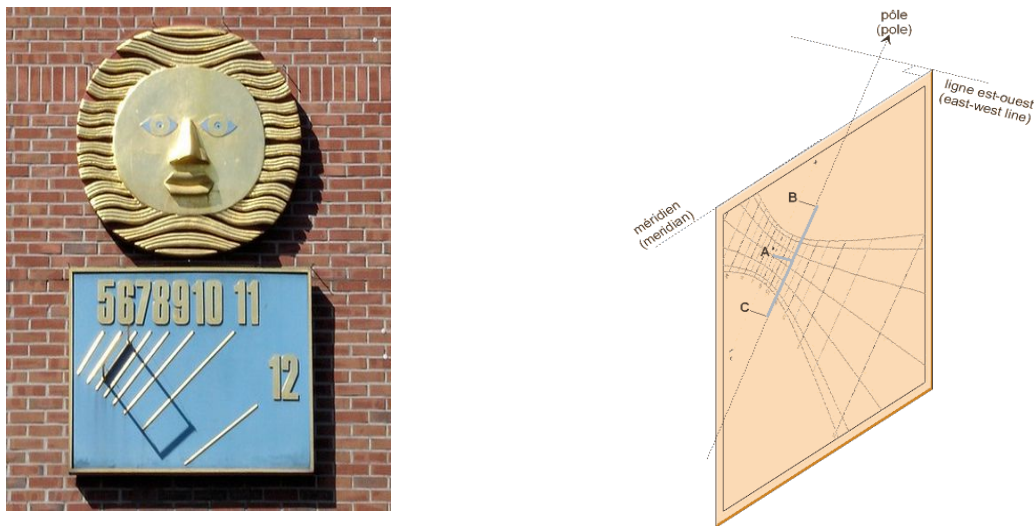


Figure 3.12. Cadran Solaire Occidental [35]

Même remarques que pour l'occidental, mais le cadran orienté plein est, la déclinaison du mur est de -90° et le style est placé sur la ligne de 6h. Le cadran est éclairé du lever à 12h. [35]

3.2.3.8. Les cadrans inclinés

Le principe est le même que pour les cadrans verticaux mais on doit tenir compte de l'inclinaison de la table. On retrouve tous les cas d'orientation sud, sud-est, sud-ouest, etc... Par contre hormis les cadrans méridionaux et septentrionaux, la ligne horaire de 12 h ne sera pas dans l'axe, elle se situera soit à droite soit à gauche de l'axe du cadran. La ligne de référence à partir de laquelle sera tracé le cadran sera toujours l'axe que l'on appelle ligne de plus grande pente. Ces types de cadrans sont assez complexes à tracer.

On rencontre parfois des cadrans multiples qui comportent des cadrans inclinés déclinants. Par exemple, un polyèdre (le plus souvent à 10 faces) peut voir chacune de ses faces décorée d'un cadran de type différent. Le cadran incliné déclinant sera donc utile pour les autres faces que celles verticales ou horizontales.[27]

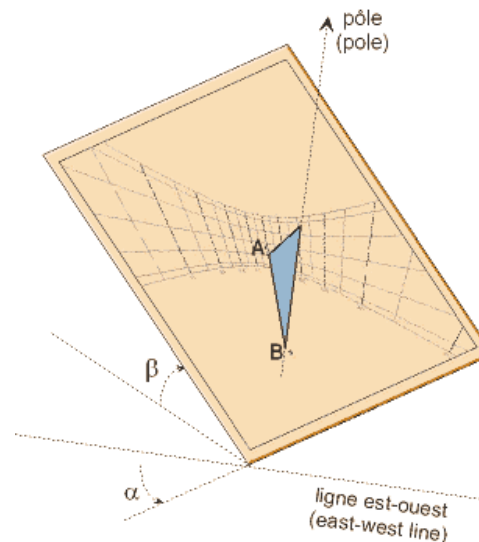


Figure 3.13. Cadrans inclinés déclinants [36]

3.2.3.9. Le cadran polaire

Le cadran équatorial est un cas particulier du cadran quelconque pour lequel le tracé des lignes horaires devient très simple. En effet, ce cadran est placé dans le plan de l'équateur céleste (prolongement de l'équateur terrestre à l'infini).

Le style est perpendiculaire au plan, orienté vers le pôle nord céleste (pôle sud). Les ombres sont rectilignes et se déplacent à l'opposé du Soleil à la même vitesse. Les lignes horaires sont donc disposées régulièrement tous les 15° ($360^\circ / 24 \text{ h}$). Les lignes de déclinaison sont des cercles. C'est le seul cadran qu'il est facile de fabriquer sans aucun calcul.

Ce cadran possède deux faces tracées : la face supérieure éclairée entre l'équinoxe de printemps et celui d'automne, et la face inférieure éclairée entre l'équinoxe d'automne et celui de printemps. Au moment des équinoxes, le cadran est éclairé par la tranche et n'est guère utilisable. [37]

La table du cadran polaire est parallèle à l'axe de rotation de la Terre et perpendiculaire au méridien du lieu; de ce fait, ce type de cadran n'a pas de centre, le style est parallèle à la table et les lignes horaires sont parallèles entre elles et à l'axe du monde: ce cadran ne peut indiquer ni 6 :00 h ni 18 :00 h car dans ces cas, l'ombre du style est parallèle à la table.

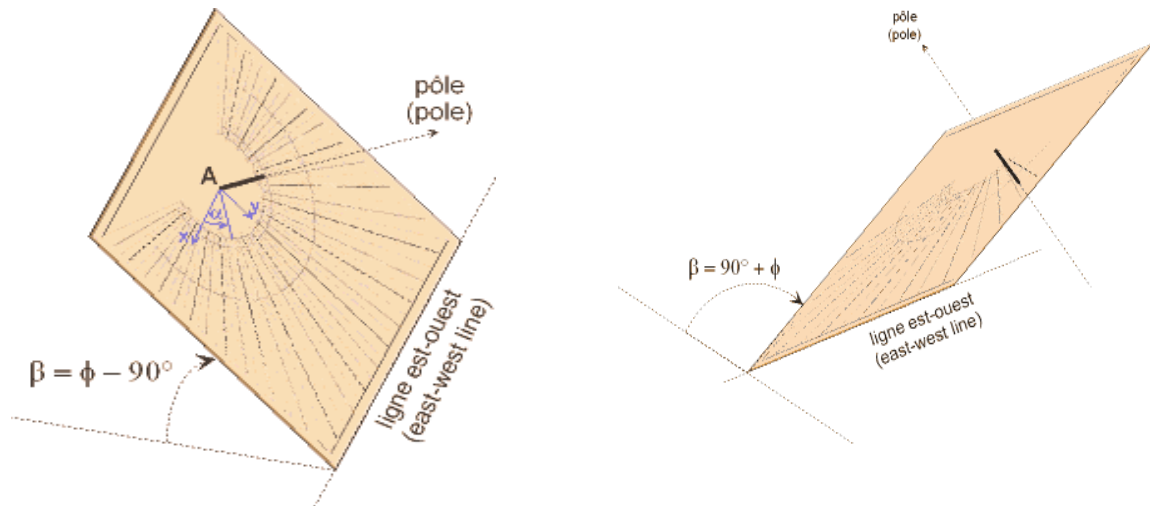


Figure 3.14.Face supérieure et face inférieure d'un cadran équatorial [37]

3.3. Équations nécessaires pour concevoir des cadrans solaires plans

Vous pouvez choisir ne importe quelle orientation pour le plan d'un cadran solaire.

3.3.1. Symboles

Obliquité de l'écliptique: ε , Latitude: ϕ Angle Horaire du soleil: H

Déclinaison du Soleil: δ Azimut: A Altitude: h

Hauteur de Nodus du Plan de Cadran solaire: L

Distance entre Nodus G_0 et Nodus G_1 : d Cosinus direction : (L, M, N)

3.3.2. Altitude et azimut du soleil

3.3.2.1. Position du soleil

Soit l'angle de déclinaison du Soleil et de l'heure à un instant donné, G et H , respectivement. Déclinaison doit être comprise entre $-H$ et $+H$ (obliquité de l'écliptique). Ces coordonnées peuvent être exprimées par le cosinus de direction dans le système de coordonnées $O-xe$ 'ye' comme suit.[38]

$$\begin{pmatrix} L_{Se}' \\ M_{Se}' \\ N_{Se}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta \cos (-H) \\ \cos \delta \sin (-H) \\ \sin \delta \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

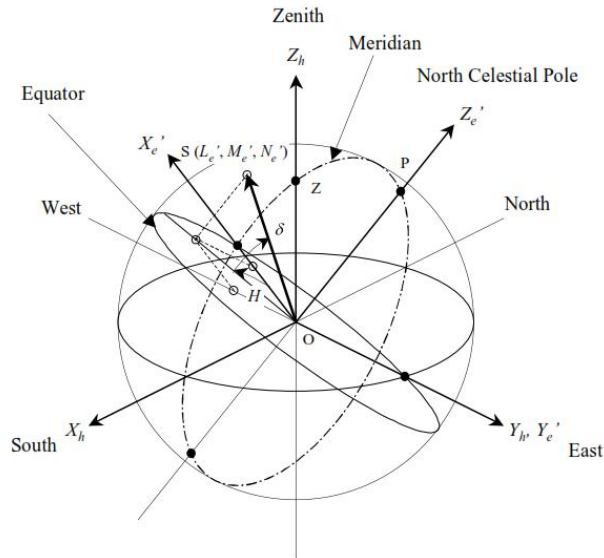


Figure 3.15. Système de coordonnées équatoriales

La position du Soleil est également exprimé en azimut A et altitude h . Azimut est mesurée à partir du sud à l'ouest. La direction cosinus de la position du Soleil dans le système de coordonnées horizontale $O-x_h-y_h$ est exprimée dans l'équation suivante [38]:

$$\begin{pmatrix} L_{Sh} \\ M_{Sh} \\ N_{Sh} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos h \cos (-A) \\ \cos h \sin (-A) \\ \sin h \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

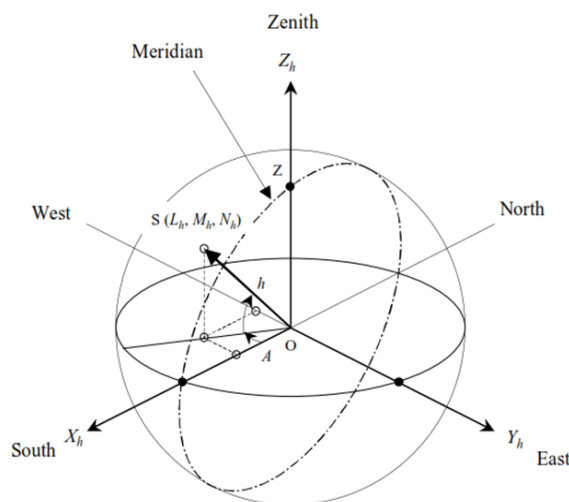


Figure 3.16 : Système de coordonnées horizontales

Les coordonnées équatoriales du Soleil peuvent être transformées en coordonnées horizontales utilisant l'équation suivante. La latitude géographique du cadran solaire est ϕ [38]

$$\begin{pmatrix} L_{Sh} \\ M_{Sh} \\ N_{Sh} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\phi - \frac{\pi}{2}) & 0 & \sin(\phi - \frac{\pi}{2}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\phi - \frac{\pi}{2}) & 0 & \cos(\phi - \frac{\pi}{2}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_{Se}' \\ M_{Se}' \\ N_{Se}' \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

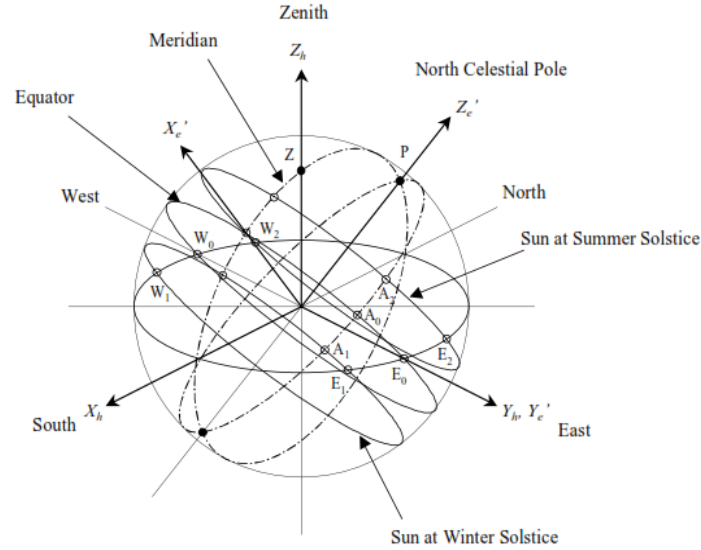


Figure 3.17 : Position du soleil

3.3.3 Position des ombres

3.3.3.1 Plan de cadran solaire et Nodus

Comme le montre la figure 3.18, le cadran du cadran est dans le plan $O-x''-y''$, où le système de coordonnées du cadran est $O-x''-y''$. Nodus principale G0 est réglé sur z'' axe normale à la face de cadran avec la distance l . Un autre G1 nodus est sur la ligne dirigée vers le pôle nord céleste de G0 et la distance entre G0 et G1 est d .

La relation entre le système de coordonnées horizontal et le cadran solaire système de coordonnées est le suivant. Le système coordonnée horizontale est tourné θ_x autour Z_h -axe et devient $O-x'-y'-z'$ système de coordonnées. Puis, $O-x'-y'-z'$ système de coordonnées est tourné θ_y autour de y' -axe pour le cadran solaire système de coordonnées $O-x''-y''-z''$. [38]

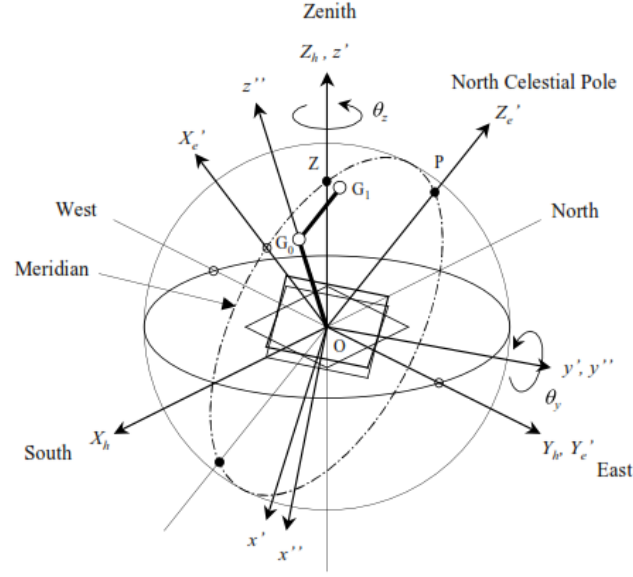


Figure 3.18. Système de coordonnées d'un cadran solaire.

Le cosinus de direction de la $O-x'-y'-z'$ système de coordonnées est exprimé comme suit:

$$\begin{pmatrix} L' \\ M' \\ N' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \zeta \cos \xi' \\ \cos \zeta' \sin \xi' \\ \sin \zeta' \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Ensuite, le cosinus de direction dans le système de coordonnées horizontal est transformé en système de coordonnées $O-x'-y'-z'$

$$\begin{pmatrix} L' \\ M' \\ N' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 \\ -\sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_h \\ M_h \\ N_h \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Direction de cosinus en $O-x''-y''-z''$ système de coordonnées est exprimé comme suit.:

$$\begin{pmatrix} L'' \\ M'' \\ N'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \zeta'' \cos \xi'' \\ \cos \zeta'' \sin \xi'' \\ \sin \zeta'' \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Enfin, le cosinus de direction dans système de coordonnées $O-x'-y'-z'$ est transformé en système de coordonnées du cadran système de coordonnées $O-x''-y''-z''$. [38]

$$\begin{pmatrix} L'' \\ M'' \\ N'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_z & 0 & -\sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L'' \\ M'' \\ N'' \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

En utilisant les équations ci-dessus, le cosinus de direction du Soleil dans le système de coordonnées horizontal peut être transformé à la direction de cosinus dans le cadran système de coordonnées, $(L_{sh}', M_{sh}', N_{sh}')$. [38]

3.3.3.2 Coordonnées de Nodus G1 dans le système de coordonnées cadran solaire

La direction cosinus de Ze' l'axe dans le système de coordonnées équatorial est $(0, 0, 1)$. Ce vecteur est transformé en système de coordonnées du cadran comme suit:

$$\begin{pmatrix} L_{sh} \\ M_{sh} \\ N_{sh} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\phi - \frac{\pi}{2}) & 0 & \sin(\phi - \frac{\pi}{2}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\phi - \frac{\pi}{2}) & 0 & \cos(\phi - \frac{\pi}{2}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

$$\begin{pmatrix} L_s' \\ M_s' \\ N_s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 \\ -\sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_{Nh} \\ M_{Nh} \\ N_{Nh} \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

$$\begin{pmatrix} L_s'' \\ M_s'' \\ N_s'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_y & 0 & -\sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_N' \\ M_N' \\ N_N' \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

Ensuite, les coordonnées de nodus G1 dans le système de coordonnées cadran solaire est exprimé comme suit:

$$\begin{pmatrix} x_{G1}'' \\ y_{G1}'' \\ N_{G1}'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ l \end{pmatrix} + d \begin{pmatrix} L_N'' \\ M_N'' \\ N_N'' \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

3.3.3.3 Les ombres des Nodus

La figure 5 montre ombres du nodus.

La position de l'ombre de nodus G0 dans le système de coordonnées cadran est

$$\begin{pmatrix} x_{GS0}'' \\ y_{GS0}'' \\ N_{GS0}'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ l \end{pmatrix} - \frac{l}{N_s''} d \begin{pmatrix} L_s'' \\ M_s'' \\ N_s'' \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

La position de l'ombre de nodus G1 dans le système de coordonnées cadran est [38]:

$$\begin{pmatrix} x_{GS1}'' \\ y_{GS1}'' \\ N_{GS1}'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ N_{G1}'' \end{pmatrix} - \frac{N_{G1}''}{N_s''} \begin{pmatrix} L_s'' \\ M_s'' \\ N_s'' \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

Il est évident que Z_{GS0}'' Et Z_{GS1}'' Sont zéro

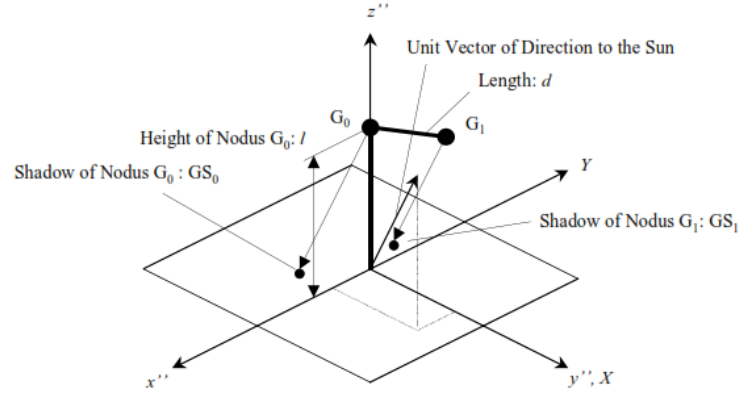


Figure 3.19 : Ombres d'Nodus

Enfin, le système de coordonnées du cadran solaire est transformé en système de coordonnées O-X-Y dans la figure 5.

$$\begin{pmatrix} X_{GS0} \\ Y_{GS0} \\ Z_{GS0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{GS0}'' \\ -x_{GS0}'' \\ z_{GS0}'' \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

$$\begin{pmatrix} X_{GS1} \\ Y_{GS1} \\ Z_{GS1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{GS1}'' \\ -x_{GS1}'' \\ z_{GS1}'' \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

3.3.4. Passages d'un système de coordonnées à un autre :

Les coordonnées d'un astre dans les différents systèmes peuvent être obtenues :

- soit par le calcul en utilisant des relations trigonométriques
- soit au moyen d'un instrument : l'astrolabe

3.3.4.1 Formules générales

Coordonnées horizontal → coordonnées horaires → coordonnées équatoriales

$$\begin{aligned}
 \sin \delta &= \sin \varphi \cdot \cos z - \cos \varphi \cdot \sin z \cdot \cos \alpha \\
 \cos \delta \cdot \sin H &= \sin z \cdot \sin \alpha \\
 \cos \delta \cdot \cos H &= \cos \varphi \cdot \cos z + \sin \varphi \cdot \sin z \cdot \cos \alpha \\
 \alpha &= T - H
 \end{aligned}
 \tag{3.16}$$

$$\begin{aligned}
 H &= T - \alpha \\
 \cos z &= \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos H \\
 \sin z \cdot \sin \alpha &= \cos \delta \cdot \sin H \\
 \sin z \cdot \cos \alpha &= -\cos \varphi \cdot \sin \delta + \sin \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos H
 \end{aligned}
 \tag{3.17}$$

Coordonnées équatoriales → coordonnées écliptique

$$\begin{aligned}
 \sin b &= \cos \varepsilon \cdot \sin \delta - \sin \varepsilon \cdot \cos \delta \cdot \sin \alpha \\
 \cos b \cdot \cos l &= \cos \delta \cdot \cos \alpha \\
 \cos \delta \cdot \sin \alpha &= -\sin \varepsilon \cdot \sin b + \cos \varepsilon \cdot \cos b \cdot \sin l
 \end{aligned}
 \tag{3.18}$$

Coordonnées écliptique → coordonnées équatoriales

$$\begin{aligned}
 \sin \delta &= \cos \varepsilon \cdot \sin b + \sin \varepsilon \cdot \cos b \cdot \sin l \\
 \cos \delta \cdot \cos \alpha &= \cos b \cdot \cos l \\
 \cos \delta \cdot \sin \alpha &= -\sin \varepsilon \cdot \sin b + \cos \varepsilon \cdot \cos b \cdot \sin l
 \end{aligned}
 \tag{3.19}$$

3.4. Comment lire l'heure sur un cadran solaire ?

L'heure solaire est suffisante en elle-même, cependant il est intéressant de calculer l'heure légale à partir de l'heure solaire affichée sur le cadran.

Pour cela il faut appliquer en général trois corrections à l'heure solaire affichée sur le cadran pour obtenir l'heure légale [39]:

- La correction en longitude.
- La correction de l'équation du temps.
- L'ajout d'une heure en hiver ou 2 heures en été.

3.4.1. Correction en longitude

le globe terrestre est divisé en 24 fuseaux horaires à l'intérieur desquels l'heure 'légale' reste la même. Dans chaque fuseau horaire la longitude varie de 15° (relativement de -7.5° à $+7.5^\circ$ par rapport au centre du fuseau).

Au centre du fuseau horaire, le temps civil (heure légale) est égal au temps solaire moyen. Pour les autres endroits du fuseau il faut faire une correction en longitude de 4 minutes par degré de longitude comme indiqué dans le tableau suivant.

Longitude du lieu	Décalage de longitude en minutes et secondes	Remarque
$7^\circ 12$ Est STDV	-28 mn 48s	Le soleil arrivera à Greenwich plus tard
$1^\circ 27$ Est Toulouse	-5 mn 48s	Le soleil arrivera à Greenwich plus tard
$4^\circ 30$ Ouest Brest	+ 18mn	Le soleil est déjà passé à Greenwich
$73^\circ 30$ Ouest-Montréal	- 6 mn	Le soleil arrivera au méridien 75° plus tard

Tableau 3.II : Exemple de Correction en longitude [39]

3.4.2. Correction de l'équation du temps

La rotation de la terre sur elle-même sur un axe incliné et sa trajectoire elliptique autour du soleil font que la durée entre deux passages du soleil au méridien local n'est pas constante.

Les légères différences de durée journalière d'un jour sur l'autre (inférieures à 30 secondes) s'accumulent et le décalage peut s'annuler ou atteindre un maximum de plus ou moins 16 minutes. La conséquence essentielle est qu'au cours de l'année, l'instant du passage du Soleil au méridien (le midi solaire) se décale lentement jour après jour par rapport au midi indiqué par une horloge parfaitement réglée. [39]

Ces écarts sont traduits par l'équation du temps et représentent la différence entre le midi moyen (temps civil local) d'une horloge parfaitement réglée et le midi vrai (au soleil)
Exemples de correction :

1 février	+ 14 mn	16 septembre	- 5 mn
5 août	+ 5 mn	1 octobre	- 10 mn
5 novembre	- 16 mn	25 décembre	0 mn

Par rapport à l'heure solaire "vraie" qui vaut midi lorsque le soleil passe au méridien, il faut opérer la correction indiquée par l'équation du temps pour obtenir l'heure "du temps civil local". Autrement dit, pour passer de l'heure lue sur un cadran solaire à l'heure solaire moyenne (heure civile), il faut appliquer la correction de l'équation du temps.[39]

3.4.2.1. L'heure légale

L'heure légale s'obtient en ajoutant à l'heure lue sur le cadran les différentes corrections vues ci-dessus.

L'heure légale = heure du cadran + correction en longitude + correction équation du temps +1 h en hiver (2 h en été)

Exemple de corrections à appliquer à un cadran situé à 7° 12' Est:

Le 29 juillet 2010	Heure/minute
Heure solaire	12h00 (midi)
correction 1 - longitude	-28 mn 48 s
Correction 2 - équation du temps	+6 mn 28 s
Correction 3 - heure d'été	+2 h
Heure légale	13h 37mn 40s

3.4.3. L'heure du cadran solaire

Pour simplifier la lecture de l'heure solaire, les cadrans que vous trouverez sur ce site, tiennent compte de l'heure d'hiver (TU+1H) et du décalage horaire dû à la longitude du lieu (-28mn 48s)

Pour connaître l'heure légale il faut donc ajouter à l'heure du cadran solaire, la correction de l'équation du temps et 1 heure en été. C'est le cas du cadran vertical déclinant construit ci-après.

Pour les cadrans équatoriaux étudiés plus bas, il suffit seulement d'appliquer la correction de l'équation du temps [39].

3.5. Conclusion

Le cadran solaire a plusieurs utilités. De nos jours, il est plus connu pour son aspect décoratif, mais comme nous l'avons vu, il n'en a pas toujours été ainsi. Lui et son ancêtre le gnomon ont beaucoup servi pour des études scientifiques comme celle de l'équation du temps et sa représentation graphique. Nous avons choisi de construire un cadran vertical plain sud pour illustrer notre projet.

Les étapes de la construction sont relatées dans chapitre suivant(Chapitre4).

Conception et réalisation d'un cadran solaire

4.1. Objectifs

Les objectifs visés dans le cadre de ce travail portent sur l'étude de conception et de réalisation d'un cadran solaire type vertical méridional - style plein sud- (cadran non déclinant) pour la faculté de technologie de l'université de M'sila.

4.2. Etude théorique

Il me fallait donc prendre à zéro une étude assez complexe de géométrie dans l'espace. Ce travail devait me permettre de déterminer la relation mathématique qui existe entre la position du soleil dans le ciel à un instant donné et la position de l'extrémité de l'ombre portée par le stylet sur le cadran à ce même instant. Cette étude a d'abord été menée dans le cadre assez restrictif d'un cadran vertical orienté plein sud.

4.3. Critères de choix

- Un emplacement visible par le plus grand nombre:
 - C'est à dire à proximité d'un site très fréquenté par les étudiants
 - Visible aussi par les personnes situées à l'extérieur de l'université
- Un emplacement éclairé par le soleil sur la plus longue période possible de la journée et de l'année :
 - Un mur orienté le plus au sud possible et qui ne soit pas à l'ombre en hiver lorsque le soleil est bas.
- Un mur disposant de la plus grande surface disponible (sans ouverture).

4.3.1. Le choix

Il s'est vite porté sur le mur situé au sud du bâtiment administratif

1–Avantages:

- Les étudiants passent devant à chaque fois qu'ils rentrent ou qu'ils sortent de l'université.
- Il est situé à proximité de l'entrée, il est donc visible de l'extérieur.
- Il est éclairé par le soleil (quand il y en a) toute l'année.

2– Inconvénients:

- Il est un peu éloigné de la cour principale.

4.4. Détermination de la position géographique du site

Possédant un G.P.S ou à partir d'un site «Atlas of sundials ». Ce dernier m'a permis de déterminer la longitude et la latitude à 15m près. Cette tâche n'a duré que quelques minutes.



Figure 4.1. Coordonnée du pôle Universitaire de M'sila
 Latitude : 35.741557° Nord, $\rightarrow 35^\circ 44' 29.61''$ N
 Longitude : $4^\circ 32' 50.99''$ Est, $\rightarrow 4.547498^\circ$ Est

4.5. Détermination de l'orientation du mur

4.5.1. Méthodes de mesure de déclinaison d'un mur

Plusieurs procédés ont été utilisés pour mesurer l'angle de déclinaison du mur par rapport à la direction Est-Ouest.

- 1– La boussole,
- 2– Le G.P.S. ,
- 3- Ou à partir d'un site officiel Cadran Solaire « Sun dial-zone ».

a) A l'aide d'une boussole

Vérifier que son aiguille n'est pas perturbée par la proximité de métaux ferreux.
Présenter l'axe Nord/Sud de ses graduations perpendiculairement au plan du cadran, comme indiqué sur la figure 4.2.

Le type de déclinaison est/ouest correspond au côté où est située la pointe nord de l'aiguille, par ailleurs:

- si la pointe est du côté Est, elle indique directement la valeur de la déclinaison
 - si elle est du côté Ouest, la déclinaison est le complément à 360° de la valeur indiquée par l'aiguille
- Dans le cas de la figure 4.2, la déclinaison est estimée à:
~ 25° Est ($D = -25^\circ$)

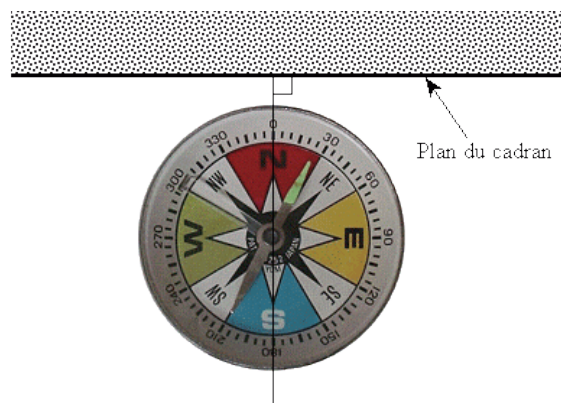


Figure 4.2. Détermination de l'orientation du mur à l'aide d'une boussole

b) A l'aide de Google Eart

Google Earth permet de récupérer la latitude et la longitude du lieu d'implantation du cadran.

Si la résolution le permet, on peut extraire un plan du bâtiment où l'implantation du cadran est envisagée. Sur la figure 4.3, la déclinaison est estimée à : ~ 15° W ($D = +15^\circ$)

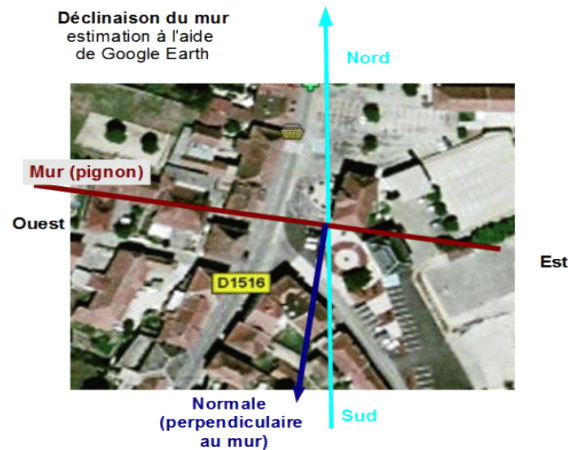


Figure 4.3. Affichage à partir site de Google Eart (M'sila)

c) À l'aide du logiciel Calcad

Avec son logiciel Calcad, On repère la position de l'ombre d'un style droit à deux moments de la journée. On obtient, entre autre, la déclinaison du mur.

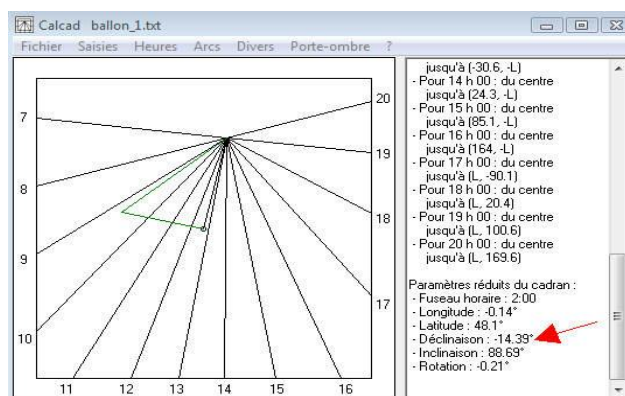


Figure 4.4. interface d'affichage du logiciel Calcad.

Pour Un cadran Vertical plein Sud (Le style est Sud Exact et L'orientation de Mur or le Cadran $D=0^\circ$).



Poster:	Cadran solaire
Longitude:	4.54746678472
Latitude:	35.7415609363
Déclinaison du mur:	0
Type de Sundial:	Mur cadran solaire
Heure affichée:	Heure solaire

Figure 4.5. Déclinaison d'un mur ou cite du pole l'universitaire de Msila

4.6. Choix du modèle de cadran.

4.6.1. Cadran vertical méridional (plein Sud)

- La table est parfaitement orientée au Sud.
- La ligne de midi est verticale. Elle matérialise le méridien local.
- Les lignes horaires sont disposées symétriquement par rapport à la ligne de midi.
- La droite horizontale passant par le centre indique 6 h le matin et 18 h l'après-midi.
- Le style est dirigé vers le sol, son plan fait face au sud. Il fait un angle avec la ligne de midi égal à la Co-latitude ($90^\circ - \text{latitude}$) du lieu.
- Le cadran méridional est le plus répandu des cadrans.

4.6.2. Heure solaire locale vraie

- Le midi solaire local marque l'instant où le soleil est à la verticale de l'endroit considéré.
- Cette heure est locale, elle est différente d'un endroit à un autre.
- C'est l'heure utilisée jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle. Elle est donnée par la plupart des cadrans solaires.

- Inconvénient : L'heure indiquée ne correspond en rien à l'heure légale (Celle que donnent les horloges).

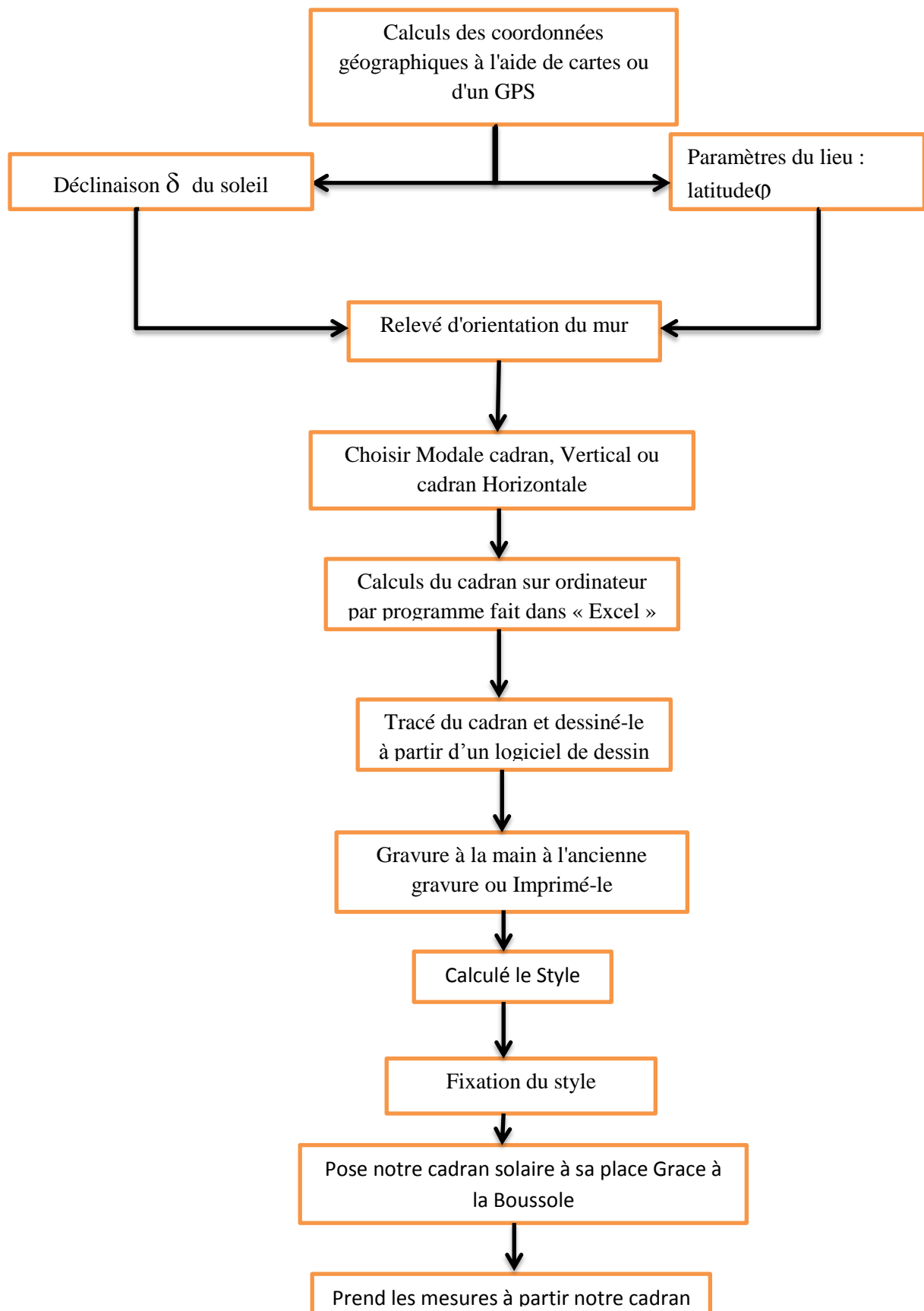
Par exemple : Un site latitude $47^\circ 13' \text{ N}$

longitude $\lambda = 1^\circ 33' \text{ W}$ (Voir le figure 4.3)

Remarque

- Du fait de ce changement d'heure (heure d'hiver et heure d'été), il est difficile de concevoir un cadran solaire indiquant l'heure légale.

4.6.3. Algorithme des Etapes de Calculé et tracer d'un cadran Solaire



4.7. Partie 1 : Conception d'un cadran méridional (vertical plein Sud)

4.7.1. Etape 1 : Le Traçage les linge d'un cadran Solaire

-On a Tracé des repères des lignes horaires et linge de midi à partir de programme qui fait par « Excel ». Par exemple :

- Choisir sur cette ligne la position du point C centre du style.
- Conformément à la (figure. 4.7), tracer les lignes horaires de l'après-midi, en reportant les angles H (Attention h = 1 correspond à 13 h).
- Tracer les lignes horaires du matin par symétrie.
- Les lignes de 6h et 18h sont perpendiculaires à la ligne de midi.
- Le tracé définitif est représenté (figure 4.7)

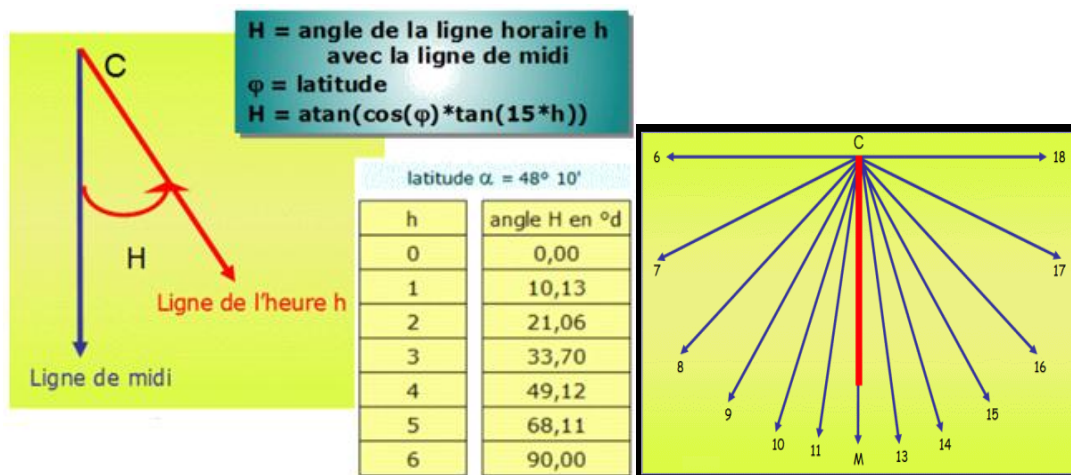


Figure 4.6. Explication sur L'étape 1

les Equation que le trace les lignes horaires et linge de midi, aussi l'équinoxe et les solstices (été, hiver) (à partir le Chapitre 3)

$$H = h \times 15 \quad (4.1)$$

ou

- H : l'Angle Horaire (degré).
- h : L'Angle Horaire de la linge (heure).

$$Le' = \cos(H / 180 \times \pi) \times \cos(-D / 180 \times \pi) \quad (4.2)$$

$$Me' = \cos(H / 180 \times \pi) \times \sin(-D / 180 \times \pi) \quad (4.3)$$

$$Ne' = \sin(H / 180 \times \pi) \quad (4.4)$$

$$\cos = \cos((\lambda - 90) / 180 \times \pi) \quad (4.5)$$

$$\sin = \sin(\lambda - 90) / 180 \times \pi \quad (4.6)$$

- Ou
- D : déclinaison ;
 - λ : L'altitude
 - (Le', Me', Ne') des points dans les coordonnées équatoriale.
 - (Lh, Mh, Nh) des points dans coordonnéé horizontal.
 - (L, M, N) des points dans coordonnéé d'un cadrans Solaires.

$$Lh = \cos(\text{cord eq}) \times Le' + \sin(\text{cord eq}) \times Ne' \quad (4.7)$$

$$Mh = Me'$$

$$Nh = -\sin(\text{cord eq}) \times Le' + \cos(\text{cord eq}) \times Ne' \quad (4.8)$$

$$\cos = \cos(\theta_z/180 \times \pi) \quad (4.9)$$

$$\sin = \sin((\lambda - 90)/180 \times \pi) \quad (4.10)$$

$$L' = \cos(\text{cord Horz}) \times Lh + \sin(\text{cord Horz}) \times Mh \quad (4.11)$$

$$M' = -\sin(\text{cord horz}) \times Lh + \cos(\text{cord Horz}) \times Mh$$

$$N' = Nh ;$$

$$\cos = \cos(90/180 \times \pi) \quad (4.12)$$

$$\sin = \sin(90/180 \times \pi) \quad (4.13)$$

$$L'' = \cos(\text{cadran}) \times L' - \sin(\text{cadran}) \times N' \quad (4.14)$$

$$M'' = M' ; N'' = \sin(\text{cadran}) \times L' + \cos(\text{cadran}) \times N'$$

4.7.2. Etape 2 : Positionnement du Style

Le style fait avec la ligne de midi un angle égal à la Co-latitude du lieu ($90^\circ -$ où est la latitude) comme sur la figure 4.8

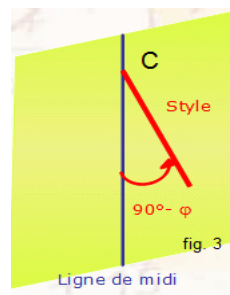


Figure 4.7. Le style

G0 et G1 des Nodus 'un Style G0 (0, 0,1) et G1 (y'', -x'', z'')

Nodus1 G0 :

$$\begin{aligned}x'' &= 0 ; y'' = 0 ; z'' = 1 \\X &= y'' ; Y = -x'' ; Z = z''\end{aligned}$$

Nodus1 G1:

$$x'' = x''(G0) + d(G0 - G1) \times l'' \quad (4.15)$$

$$y'' = y''(G0) + d(G0 - G1) \times M''$$

$$z'' = z''(G0) + d(G0 - G1) \times N''$$

Le style doit être implanté parallèlement à l'axe des pôles et orienté plein sud, dans le prolongement du plan du méridien.

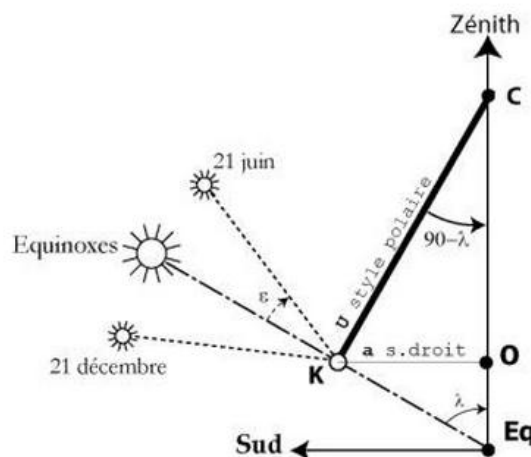


Figure 4.8. Définir L'orientation du Style d'un cadran Solaire

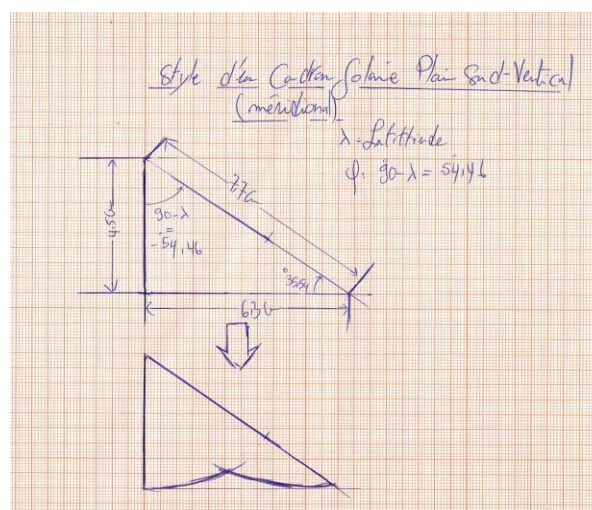


Figure 4.9. Le Style sur Papier millimétrique

4.7.3. Utilisation Les Formules de calcul sur « EXCEL »

C'est juste écrivez les données de votre latitude et Orientation du cadran, les feuilles de calcul calculent les positions des ombres de la nodus sur le cadran.

2										
3	Obliquité de l'écliptique (deg)		23,43818611		4.54871401191					
4	Latitude (deg)		35,74121696		23.4373408135°					
5	Latitude -90		-54,25878304							
6	Orientation de cadran (deg)	6z	-18,4	←	Mesure du sud à l'est.					
7		6y	90	←	0 pour cadran horizontal et 90 pour cadran vertical					
8	Longueur du Gnomon		1	←	Longueur du gnomon est utilisé comme unité de longueur pour l'échelle cadran solaire.					
9	Distance G0-G1		0,6							
10	Le temps de calculer Analemma		12:00:00							

- La position géographique du cadran (longitude et latitude)
- L'orientation du mur par rapport à la direction EST-OUEST.
- La longueur du Style.

b) Page de calcul EXCEL

c) Le résultat a partir «Microsoft Office Excel » un cadran solaire (Vertical plain sud)

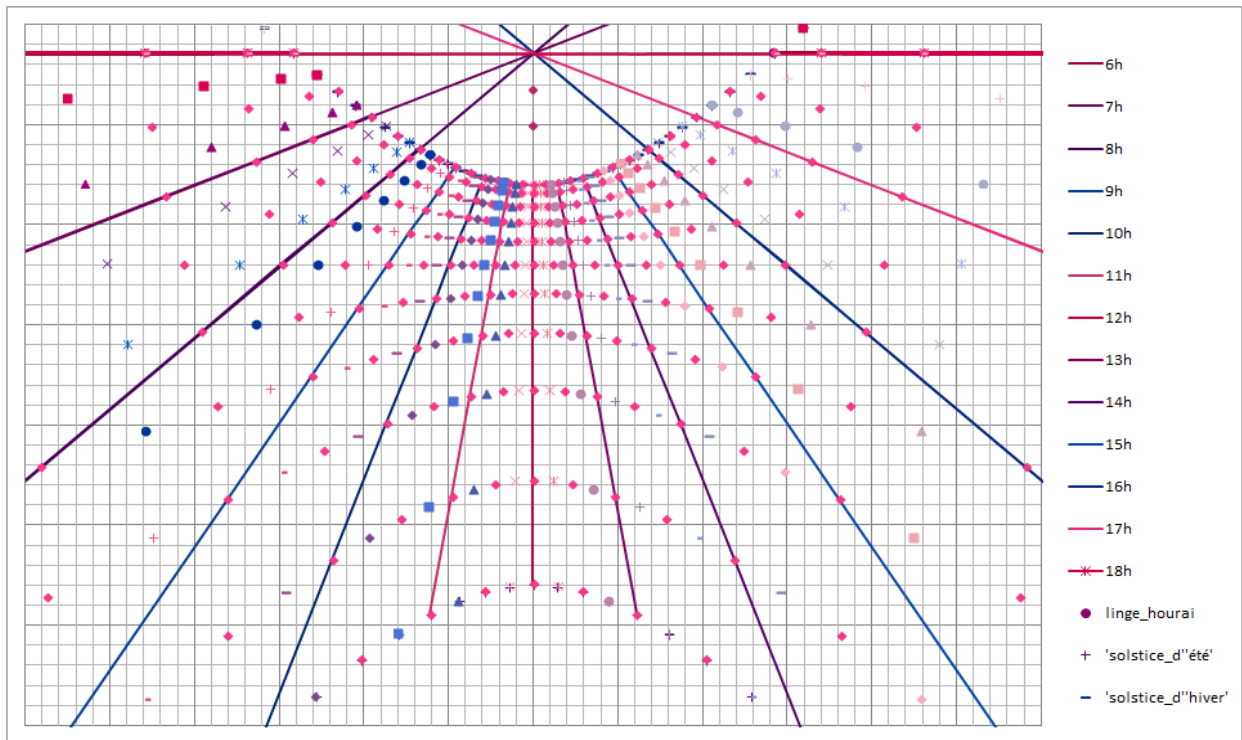


Figure 4.10. Trace d'un cadran Solaire (Cadran Solaire Vertical plain Sud)

Et pour terminer notre cadran par le logiciel du dessin « Photoshop » et voilà le résultat final

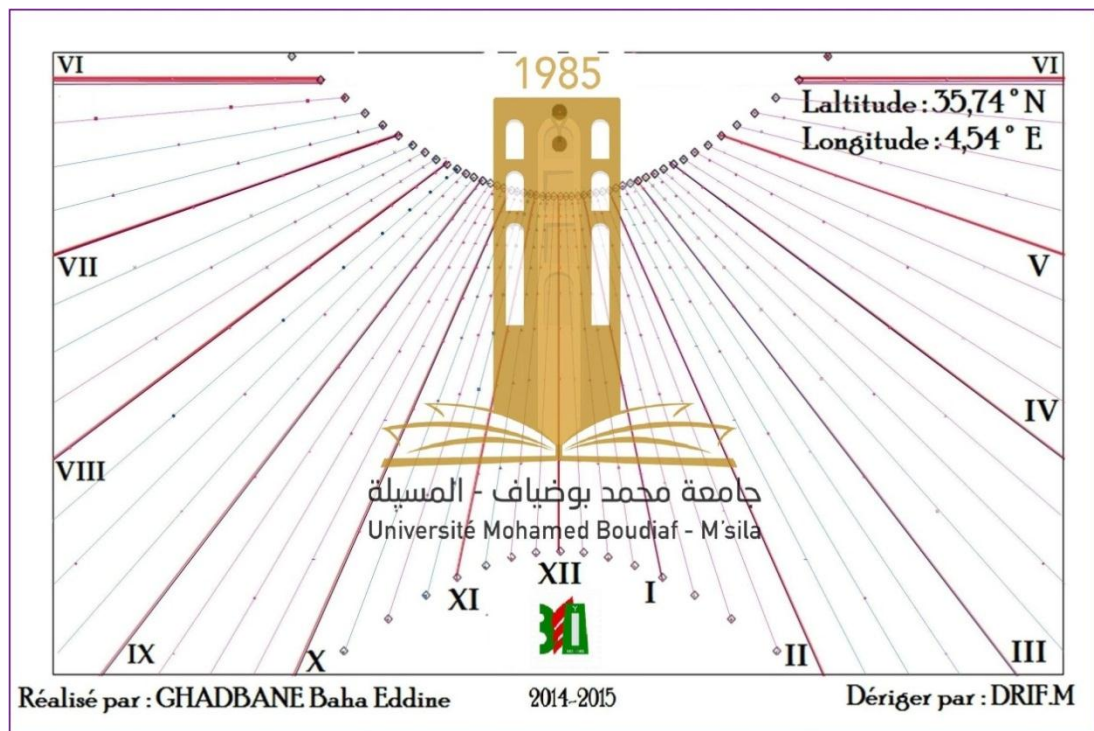


Figure 4.11. Conception Final d'Un cadran Solaire Vertical plain Sud

4.8. Partie 2 : construction d'un cadran solaire méridional

4.8.1. Matériel

- Une plaque de composite transparent marine 60 cm x 40 cm, épaisseur 5 mm pour le cadran
- Une tige d'aluminium pour le support et le cadre
- Une feuille autocollant de diamantions 60 cm x 40 cm
- Une feuille de composite de dimension 45mm x 63 mm style et des vis

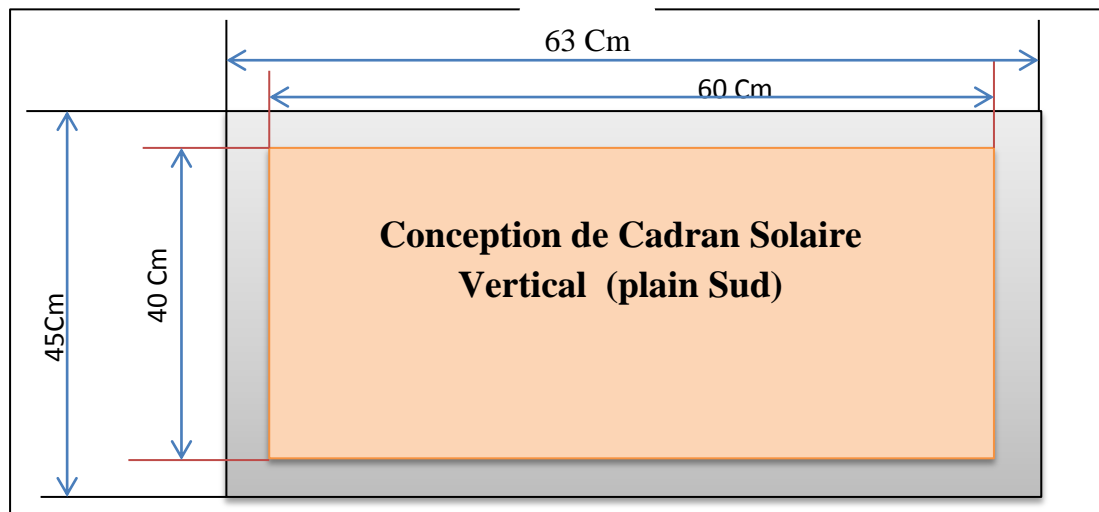


Figure 4.12. Plan d'un cadran Solaire Vertical (plain sud).

4.8.2. La Réalisation

On prit le model qu'on a fait la conception dans la partie précédente et on augmenter la résolution pour l'imprimer avec le logiciel DAO.

On a imprimé le cadrant chez un magasin de panneau publicitaire dans un papier autocollant avec une imprimante spécial conçue pour ce genre de papier

Après en coupe la plaque de composite transparent avec une coupe verre tête diamant

On a collé le papier sur le cadran et on a tenté l'arrière de la plaque avec du noir pour éliminer la transparence

Après on prend le panneau chez un atelier de menuiserie d'aluminium ou en va construire un support pour tenir le cadrant debout en a fait deux tige d'aluminium et en l'a placé dessous le cadre qui entoure le cadrant avec des vis en créant un angle de 90°.



Figure 4.13. Mesure du cadre pour notre Cadran



Figure 4.14. Le découpage des tiges d'aluminium

On a coupé les tiges d'aluminium avec une tronçonneuse a disque d'acier avec un angle de 45°.

On place les 4 coins du cadre avec des vis.



Figure 4.15. Emplacement de la base



Figure 4.16. L'état de la base

Dans la partie du style en a pris une feuille de composite et en l'a couper avec les dimension prescrite dans la partie de conception avec une tronçonneuse trouver dans l'atelier d'aluminium en a coller le style avec la matière de silicone .

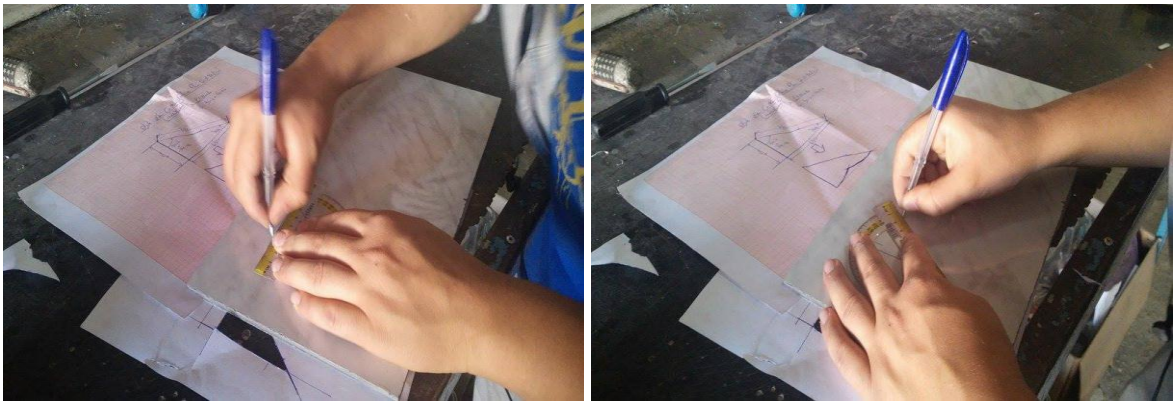


Figure 4.17. Préparation du style

En place le style à 90° du cadran



Figure 4.18. L'emplacement du style.

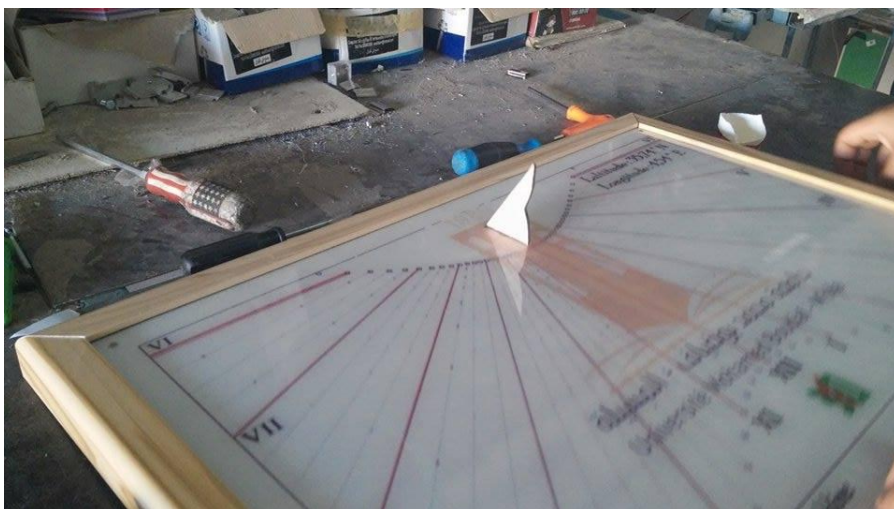


Figure 4.19. Le style est placé.



Figure 4.20. Le cadran est fini

4.9. Partie 3 : L'Application

4.9.1. Le matériel utilisé

- Boussole professionnel.
- Appareil à photo.
- Montre.

4.9.2. Les Essais

En place le cadran dans notre site qui est définit précédemment ,ce espace bien ensoleiller en sachant que le style doit être dans le plein Sud a l'aide de la boussole et pour l'orientation du cadran il doit être 0° et on a fait les essai dans plusieurs temps différent .



Figure 4.21. Emplacement du cadran par la boussole

On a placé la boussole sur le cadran pour connaître la direction du sud.

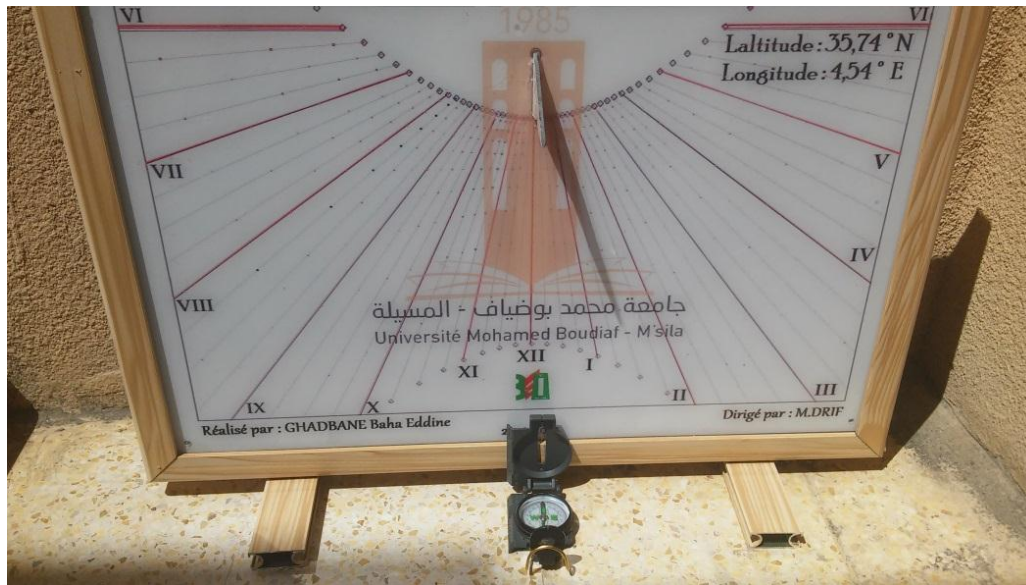


Figure 4.22. Le cadran est bien placer

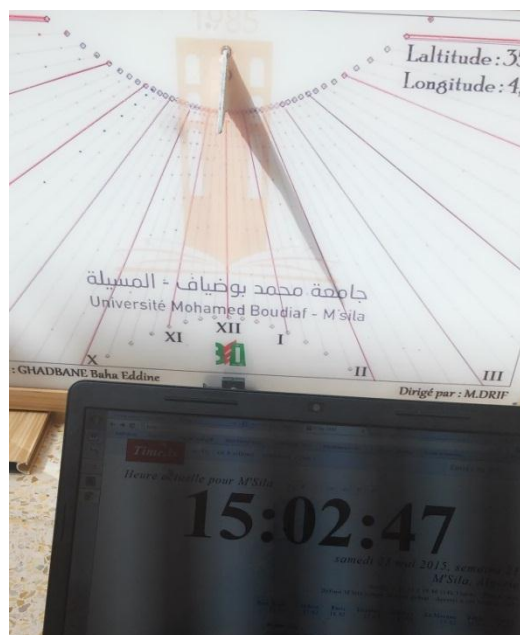


Figure 4.23. Essai n 1

Cette essai est fait à 15 :02 (Voire la figure 4.21) le temps qui affiche dans le cadrant est égale à 02 : 00 PM

Le temps qui affiche dans le cadrant C'est le temps solaire local vrai et le temps qui affiche dans le pc est le temps légal et en remarque que la différence entre les deux temps c'est presque 1 heure.

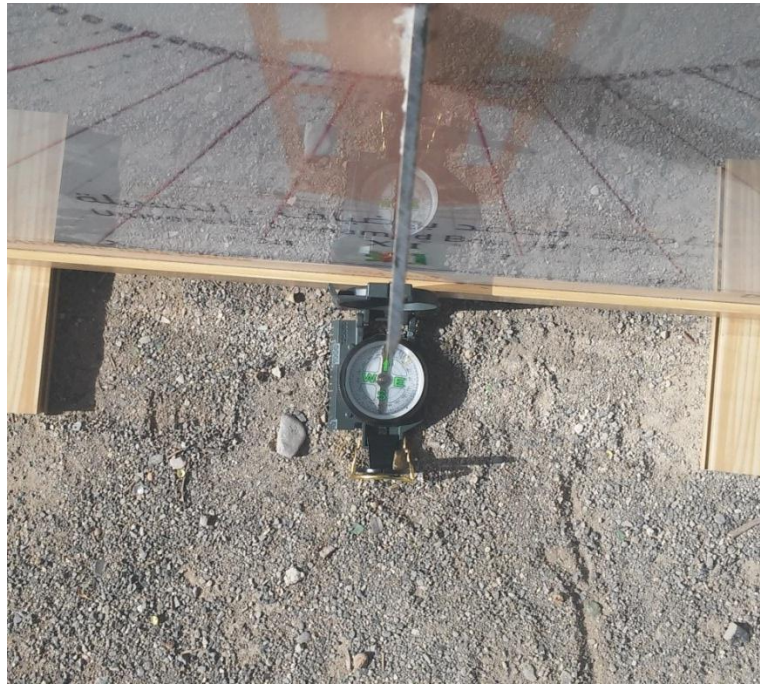


Figure 4.24. Le placement du cadran en fonction de la boussole

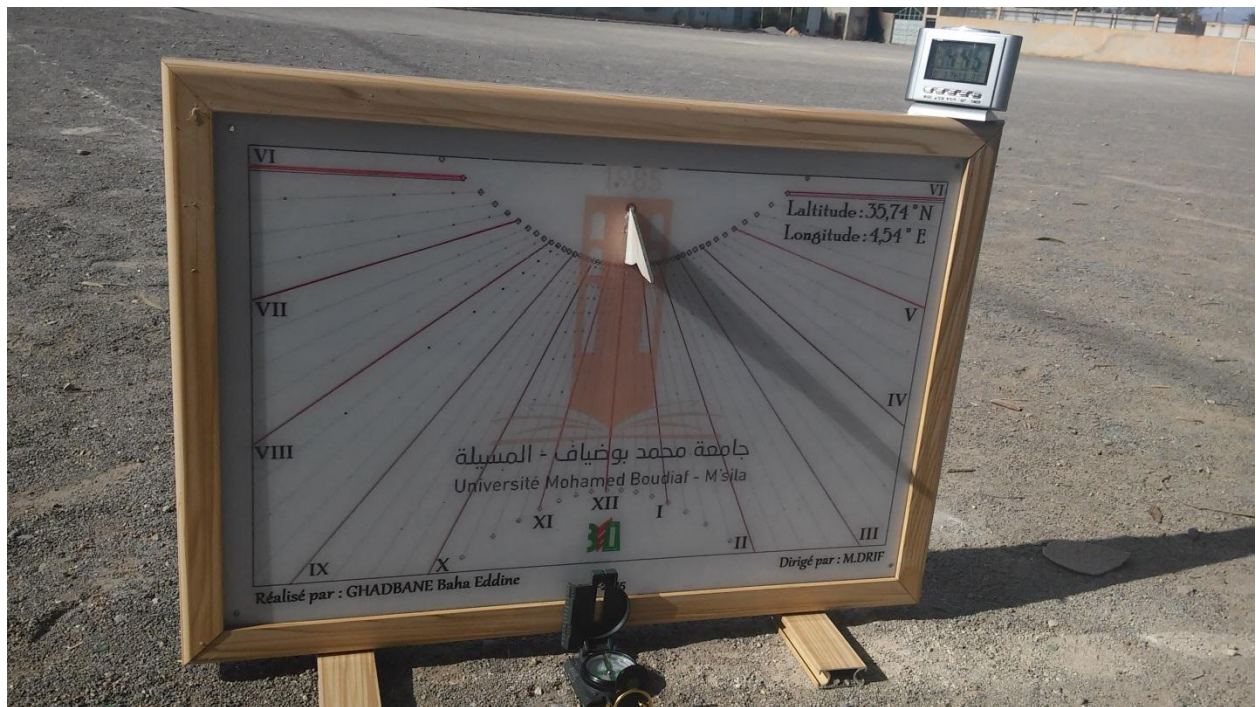


Figure 4.25. L'emplacement du cadran dans autre place

On a essayé changer le site, ce site pas loin a partir le 1^{er} site .mais cette fois on a Utilisé L'horloge Numérique elle Bien réglé. Comme nous voyons L'ombre dans le cadran à égalier 03 :45 PM et on voit sur cadran le montre affiche 4 :45 PM .presque décalage 1 heure.

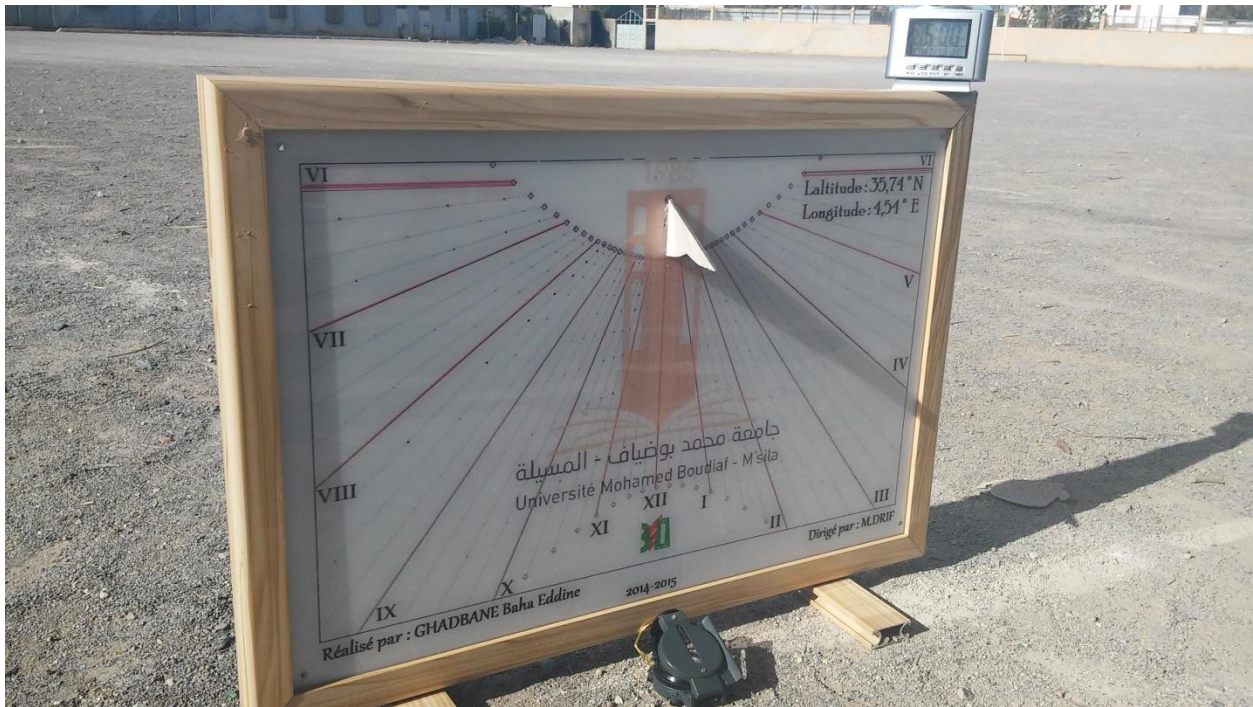


Figure 4.26. Suivi L'ombre d'un cadran Solaire

A partir d'un quart d'heure on a vu L'ombre qui indiquait à IV c'est-à-dire L'heure de cadran égale 04 :00 PM et on ajout 1 heure on a trouvé L'heure sur notre Montre.

4.10. Conclusion :

Le Cadran Solaire est une Utile qui mesure le temps, marche avec le mouvement de soleil L'ombre du style donne une indication de l'heure solaire. Le temps qui Affiche dans le cadran c'est le temps Solaire vrais (TSV) et pour trouver Notre temps Local on a fait quelque Calcule très Simple à partir L'équation de temps dans notre Site. et la réalisation de ce travail Entre la limites des martial disponible.

Cette étude nous a permis à mettre en évidence le besoin sincère de cadran solaire dans les domaines d'Etude de mouvement Soleil

Conclusion générale

Avant d'entreprendre ce sujet, nous ne nous rendions pas compte des progrès qu'avaient apportés les cadrans solaires aux civilisations du monde entier dans le découpage du temps. La mesure du temps a toujours été très importante pour l'homme, on peut le voir à l'époque néolithique par exemple, lorsqu'il était nécessaire de connaître plus précisément le temps afin de faciliter les moissons et semailles. De nos jours, avec la conquête spatiale, il est d'autant plus indispensable d'avoir un découpage du temps qui soit précis. Grâce au développement de la gnomonique datant de la Préhistoire, nous avons pu développer au 14^{ème} siècle les premières horloges mécaniques qui nous ont conduit aussi aux premières montres.

Dans la partie de conception, quelques domaines ont été difficiles à traiter, comme les notions de cosmographies dans un référentiel géocentrique ainsi que l'équation du temps. Concernant la réalisation de notre cadran solaire, il nous est clairement apparu que la précision, qu'elle soit dans les calculs, les changements d'unités ou les mesures étaient la clé d'une construction réussie du cadran horizontal. L'étude du cadran solaire nous a permis de développer de manière agréable nos connaissances dans les domaines astronomiques, historiques et culturels.

Aujourd'hui, la lecture de l'heure sur un cadran solaire n'est pas compliquée en soi, en revanche la conversion de l'heure solaire en heure légale est une autre affaire. En effet, le fait de devoir employer un outil astronomique dépendant du Soleil et de ses ombres n'est pas une tâche aisée. De ce fait, les cadrans sont vite concurrencés par les premières horloges et montres et deviennent de préférence un objet plus décoratif qu'utilitaire. Néanmoins, le cadran reste toujours d'actualité pour l'éducation, en particulier pour comprendre le système solaire. Les anciens cadrans solaires restent également très précieux, car à travers leur monogramme et leur graphisme, ils restent des témoins du temps écoulé et passé de notre histoire.

En a entamer dans notre premier chapitre les notions du temps et les techniques pour le mesurer pour montrer les paramètres et les méthodes de calcul, mais on avait besoin des calculs de la géométrie solaires où on en a détaillé tout ça dans le 2^{ème} chapitre grâce à des calculs cosmo-géographique. D'après ses calculs on a pu dessiner les grands triées de notre cadran solaire et les calculs et on s'est pas arrêté là, on a continué à chercher pour accomplir notre cadran et ses paramètres où on a décrit toute ses étapes dans le chapitre 3. D'après ses calculs on a pu faire la conception et la réalisation selon les moyens disponibles.

Références bibliographiques

- [1] La notion de temps par Jean Kovalevsky, membre de l'Institut Académie des Sciences morales et politiques.
- [2] Wikipédia, Temps, Disponible sur Internet : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Temps>, [consulté le 15/06/2015]
- [3] comvv, « Notions du Temps » Disponible sur Internet : <http://www.comvv.fr/expos/temps/le-temps-2.html>, [consulté le 15/06/2015]
- [4] obspm, « Histoire de l'heure » Disponible sur Internet : http://media4.obspm.fr/public/AMC/pages_mesure-temps/mctc-histoire-heure.html, [consulté le 15/06/2015]
- [5] obspm, « La mesure du temps » Auteur: Jean-Eudes Arlot Disponible sur Internet : http://media4.obspm.fr/public/AMC/pages_mesure-temps/impression.html, [consulté le 15/06/2015]
- [6] cadrans-solaires-qc.blogspot, « Les Cadrans Solaires du Québec, PAR JASMIN GAUTHIER » Disponible sur Internet : <http://www.cadrans-solaires-qc.blogspot.com>, [consulté le 15/06/2015]
- [7] imcce, html « ECHELLES DE TEMPS La fabrication du temps » Disponible sur Internet : <http://www.imcce.fr/phemu03/Promenade/pages4/447.html>, [consulté le 15/06/2015]
- [8] wikipedia ,« d'Equation du temps » Disponible sur Internet : http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quation_du_temps, [consulté le 15/06/2015]
- [9] imcce , « Rotation et révolution de la Terre : ECHELLES DE TEMPS » Disponible sur Internet : <http://www.imcce.fr/phemu03/Promenade/pages3/325.html>, [consulté le 15/06/2015]
- [10] imcce, « promenade dans système solaire » Disponible sur Internet : <http://www.imcce.fr/promenade/pages5/502.html>, [consulté le 15/06/2015]
- [11] bellesmontres, « la-difference-entre-le-temps » Disponible sur Internet : http://www.bellesmontres.com/Magazine/Le-saviez-vous/quelle-est-la-difference-entre-le-temps-solaire-moyen-et-le-temps-solaire-vrai-06-12-2012-1544780_814.php, [consulté le 15/06/2015]
- [12] energie2.arch, « Notion de temps » Disponible sur Internet : <http://www.energie2.arch.ucl.ac.be/donn%C3%A9es%20climatiques/1.2.html>, [consulté le 15/06/2015]
- [13] energie2.arch, Architecture et Climat. E. Gratia. (1998), Disponible sur Internet:

Bibliographie

<http://www-energie2.arch.ucl.ac.be/donn%C3%A9es%20climatiques/1.3.3.3.html>, [consulté le 15/06/2015]

[14] archivemiq.free, « La mesure du temps naturel : de l'antiquité au temps moderne » Disponible sur Internet: <http://archivemiq.free.fr/culture/temps/antiquite.html>, [consulté le 15/06/2015]

[15] Zeghib Ilhem, mémoire magister, « Etude et Réalisation d'un Concentrateur Solaire parabolique », université de Constantine, 2005.

[16] Alain Vienne, « Eléments d'astronomie fondamentale », Université des Sciences et Techniques de Lille, LAL-IMCCE Laboratoire d'Astronomie de Lille de l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides Lille 1 et Observatoire de Paris, UMR 8028 du CNRS, Janvier 2008.

[17] devis-panneaux-photovoltaïques, photovoltaïques Disponible sur Internet: <http://www.devis-panneaux-photovoltaïques.fr/photovoltaïque.html>, [consulté le 15/06/2015]

[18] LE PETIT LAROUSSE 2008

[19] Samira MOUHOUS-CHAOUCHI, mémoire magister, « Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné », Université ABOU BEKER BELKAID, Tlemcen, 2012.

[20] RAHMANI Djelloul, mémoire magister, « Analyse d'un système de concentration solaire pour la production d'hydrogène (cas de l'Algérie) », Université HASSIBA BENBOUALI, Chlef, 2012.

[21] Documents de l'observatoire de Paris, « Introduction à la mécanique céleste et élément de mécanique spatiale », Paris, 7 mars 2011.

[22] Université Paris-Sud Orsay – Master 2^{ème} année – Energies Renouvelables – Energie Solaire Thermique, Vincent Bourdin 2014.

[23] II Géométrie solaire , Confort Thermique – Jacques Teller, Université de Liège

[24] shadowspro , "Qu'est-ce qu'un cadran solaire ?" Disponible sur Internet : <http://www.shadowspro.com/help/fr/whatisasundial.html>, [consulté le 15/06/2015]

[25] abbaye-saint-hilaire-vacluse , " Abbaye Saint-Hilaire ,L'organisation du temps ,Les cadrans solaires" Disponible sur Internet : http://www.abbaye-saint-hilaire-vacluse.com/cadran_solaire.html, [consulté le 15/06/2015]

[26] cadransolaire28.free, "GENERALITES TECHNIQUES" Disponible sur Internet : <http://cadransolaire28.free.fr/generalites/generalites.htm>, [consulté le 15/06/2015]

[27] cadran-solaire , "LES DIFFERENTS TYPES DE CADRANS SOLAIRES" Disponible sur Internet : http://www.cadransolaire.fr/Tout_savoir_sur_les_cadrans_solaires/Les_differeents_types_de_cadrans_solaires.htm, [consulté le 15/06/2015]

[28] lescadransdeconstant , " cadrans solaires " Disponible sur Internet : <http://www.lescadransdeconstant.com/cadrans-solaires.html>, [consulté le 15/06/2015]

Bibliographie

[29] Disponible sur Internet :

<http://www.enslyon.fr/RELIE/Cadrans/Musee/Pages/PagesGr/MuCanStrasbourg.htm>,[consulté le 15/06/2015]

[30] shadowspro , "Le cadran vertical déclinant" Disponible sur Internet :

<http://www.shadowspro.com/help/fr/verticaldecliningsundial.html>,[consulté le 15/06/2015]

[31] Disponible sur Internet : <http://www.lescadransdeconstant.com/>,[consulté le 15/06/2015]

[32]<http://www.panoramio.com/photo/106684059>,[consulté le 15/06/2015]

[33] pakhomoff, " cadran solaire Pakhmoff " Disponible sur Internet :

<http://www.pakhomoff.net/>,[consulté le 15/06/2015]

[34] shadowspro , "Le cadran vertical occidental" Disponible sur Internet :

<http://www.shadowspro.com/help/fr/verticalwestsundial.html>,[consulté le 15/06/2015]

[35] shadowspro , "Le cadran vertical oriental" Disponible sur Internet :

<http://www.shadowspro.com/help/fr/verticaleastsundial.html>,[consulté le 15/06/2015]

[36] shadowspro , "Le cadran incliné déclinant" Disponible sur Internet :

<http://www.shadowspro.com/help/fr/inclineddecliningsundial.html>,[consulté le 15/06/2015]

[37] shadowspro , " Le cadran équatorial " Disponible sur Internet :

<http://www.shadowspro.com/help/fr/equatorialsundial.html>,[consulté le 15/06/2015]

[38]Article Astronomical ComputingEquations for Sundial,Written by Toshimi Taki March 8, 2008

[39] lasousta.pagesperso-orange , "Initiation & Conception des Cadrans Solaires - Cadran solaire équatorial armillaire et vertical à style polaire" Disponible sur Internet :

<http://lasousta.pagesperso-orange.fr/cadransolaire.html>,[consulté le 15/06/2015]

Résumé

Le cadran solaire a plusieurs utilités dans le monde. De nos jours, il est plus connu pour son aspect décoratif et esthétique.

Dans ce travail, nous allons montrer les différents types du cadran solaire et les différentes étapes permettant la réalisation de notre cadran qui a pour but principal la vulgarisation du domaine de l'énergie solaire en milieu étudiant.

الساعة الشمسية لديها العديد من الاستخدامات في العالم. اليوم، انها المعروفة كثيرا بمظهرها الزخرفي والجمالي. في هذا العمل، وسوف نعرف أنواع مختلفة من الساعات الشمسية و مختلف الخطوات لانجاز ساعتنا الشمسية و ذلك من اجل هدفنا الرئيسي نشر مفهوم وتوسيع مجال الطاقة الشمسية بين الطلاب

The sundial has many uses in the world. Today, he is best known for its decorative and aesthetic appearance. In this work, we will show the different types of sundial and steps for achieving our dial that main purpose of the extension field of solar energy among students.