

Ecole d'Architecture de Marseille-Luminy

S5-UE6 Construction et Ambiances

Maîtrise des ambiances

Contrôle de l'ensoleillement et de la lumière en architecture

**Développement d'un outil commun au contrôle solaire et au contrôle lumineux: la projection
sphérique équidistante zénithale**

Marc-André VELAY-DABAT

Maître-Assistant à l'EAML

Avec la participation de:

Jean-Louis IZARD

&

Patrick BONIFAIT

Edition 2004

MAITRISE DES AMBIANCES: CONTROLE DE L'ENSOLEILLEMENT EN ARCHITECTURE

Sommaire

Introduction: De la nécessité du contrôle de l'ensoleillement en architecture

CHAPITRE 1 - Contrôle de l'ensoleillement

- 1-1. Course apparente du soleil en projection sphérique
 - 1-1.1. Caractéristiques de la projection sphérique zénithale
 - 1-1.2. Construction simplifiée du diagramme solaire
 - 1-1.3. Diagrammes solaires
 - 1-1.4. Commentaires sur les courses apparentes du soleil
- 1-2. Visibilité et énergie solaire reçue par un plan
 - 1-2.1. Visibilité du plan vertical
 - 1-2.2. Visibilité du plan incliné
 - 1-2.3. Énergie reçue par le plan horizontal
 - 1-2.4. Énergie reçue par le plan vertical
 - 1-2.5. Énergie reçue par un plan incliné.
- 1-3. Masques de l'environnement
 - 1-3.1. Masques de l'environnement
 - 1-3.2. Masques constitués par des bâtiments
- 1-4. Masques architecturaux: méthode des angles d'occultation.
 - 1-4.1. Cas de l'auvent
 - 1-4.2. Cas de la joue
 - 1-4.3. Cas des loggias
 - 1-4.4. Cas du Vis-à-vis
 - 1-4.5. Cas du patio
- 1-5. Bilan d'éclairement d'un plan à travers un masque
- 1-6. Cas des écrans à lames
 - 1-6.1. Écrans à lames horizontales
 - 1-6.2. Écrans à lames verticales
 - 1-6.3. Écrans à lames croisées
- 1-7. Génération d'une protection solaire
 - 1-7.1. Principe de la méthode
 - 1-7.2. Traitement d'un exemple
- 1-8. Quelques masques architecturaux de référence
 - 1-8.1. Le Palais des Filateurs à Ahmedabad (Le Corbusier)
 - 1-8.2. Immeuble IBM à La Gaude (Marcel Breuer).

2 - Contrôle de la lumière

2-1. Rappel des grandeurs et lois

2-2. Facteur de Lumière du Jour par ciel couvert

2-2.1. Plan horizontal

2-2.2. Plan Vertical

2-3. Facteur de Lumière du Jour par ciel clair

2-3.1. Plan horizontal

2-3.2. Plan vertical

2-4. Eclairage direct par le soleil

2-4.1. Plan vertical

2-4.2. Plan horizontal

2-5. Répartition de la lumière du Jour.

2-6. Abaques de calcul de FJD

2-7. Quelques exemples de traitement de la lumière en architecture.

3 - Annexes

3-1. Diagrammes solaires latitudes 0 à 90°

3-2. Diagrammes d'éclairage énergétique de divers plans

3-3. Diagrammes d'éclairage lumineux ciel couvert et ciel clair

Préambule en forme de remerciements

Le présent polycop a été rédigé après une longue expérience pédagogique de la part des auteurs sur la représentation des phénomènes énergétiques solaires et lumineux en architecture.

Ont participé volontairement ou involontairement à la rédaction de ce polycop:

- Jean-Louis Izard, Architecte, enseignant à l'EAML, Directeur du Laboratoire ABC, en charge de cet enseignement jusqu'en 2004.
- Marc-André Dabat, Architecte, enseignant à l'EAML, enseignant-chercheur au Laboratoire ABC, qui a mis au point notamment le programme "Vinci" qui permet de dessiner les diagrammes solaires en projection sphérique.
- Patrick Bonifait, Architecte, qui a adapté à la projection sphérique les travaux de Pleijel et les a étendus aux luminances du ciel clair.
- Raymond Thiry, qui, le premier à l'EAML, avait rédigé un polycop complet sur le contrôle de la lumière naturelle.
- Plusieurs promos d'étudiants de troisième année, pour établir les diagrammes de transmission du Palais des Filateurs et de l'immeuble IBM.

Que tous soient remerciés!

Jean-Louis IZARD – Marc-André VELAY-DABAT
Octobre 2004.

Introduction:

De la nécessité du contrôle de l'ensoleillement en architecture

L'ensoleillement est responsable de divers effets sur tout bâtiment. Il peut être considéré en même temps comme:

- source d'énergie gratuite en hiver (qui entre dans le bilan énergétique de chauffage, cf. la réglementation thermique française: le coefficient B).
- source d'énergie cause d'inconfort thermique en été (très répandu).
- source lumineuse directe pouvant par pénétration directe dans les locaux provoquer un inconfort visuel.
- source lumineuse mobile, responsable des effets cinétiques mettant en jeu les modénatures de façade (cf. Twarovsky et convention de l'ombre à 45°)
- source lumineuse responsable de la luminance du ciel, qui devient à son tour source de lumière naturelle ("daylighting") pour les espaces construits.

Maîtriser le projet, c'est être en mesure de contrôler tous ces effets de l'ensoleillement, à travers les formes générales et les détails de conception des parois d'enveloppes, notamment ce qu'on appelle les "masques architecturaux".

De nombreux architectes ont mis en œuvre des formes et objets architecturaux destinés à contrôler l'ensoleillement; cela s'est traduit en général par la façade épaisse (L. Kahn, J.L. Sert, Le Corbusier) ou par la systématisation des débords (F.L. Wright, R. Neutra, M. Breuer), par la création de brise-soleil (Le Corbusier, O. Niemeyer). Cela se prolonge aujourd'hui avec l'architecture "high tech" (N. FOSTER). Toutes ces formes répondent plus ou moins efficacement à leur fonction. Cette "efficacité", notion qui doit être appréciée en fonction du climat local, dépend à la fois de la géométrie de la forme en question, mais aussi de l'orientation de la façade et de la latitude sous laquelle le bâtiment se trouve.

Ces trois types de données (géométrie, orientation, latitude) sont indissociables dans la détermination de la performance d'un système de protection solaire, ce qui fait qu'il est difficile, pour ne pas dire imprudent, de procéder à des généralisations associant directement forme et performance.

Les architectes d'aujourd'hui semblent avoir perdu la conscience de ce problème, et s'en remettent le plus souvent au hasard (formes toutes faites utilisées tous azimuts), quand ils ne s'abandonnent pas purement et simplement au non-traitement du problème (par exemple, façades en V.E.C. chères à Dominique Perrault).

Contrôler l'ensoleillement, c'est donc se donner un minimum de moyens pour vérifier que le dessin en cours correspond bien à un effet voulu: cela vaut pour toutes les formes (auvents, balcons, décrochements, loggias, patios), et pour tous les écrans solaires (lames horizontales, verticales, boîte-à-œufs, claustras).

Ces moyens reposent sur deux techniques: l'informatique d'une part, et la représentation du phénomène en vue angulaire d'autre part.

L'outil informatique:

- Contrôle de l'ensoleillement:

Certains outils de type "modeleur" sont dotés de fonctions "héliodon": c'est le cas en particulier d'"Archicad" qui permet d'exécuter les tâches suivantes:

- tracé des ombres portées en élévation ou en axonométrie;
- visualisation du parcours de la "tâche solaire" à l'intérieur du bâtiment, en vue perspective;
- axonométrie du bâtiment vu du soleil, les parties cachées sont considérées comme les parties "ombrées".

Sinon, l'outil informatique consiste en général en un traitement du problème de la transmission des masques, et cela se fait sous forme de sub-routines au sein de logiciels de thermique (type "TRNSYS") inaccessibles hors de ce contexte.

Le Laboratoire ABC a développé de son côté deux outils autonomes sur cette question:

- "Ecran solaire", qui trace les ombres portées par des masques architecturaux vus en élévation et calcule les facteurs de transmission;
- "Vinci", qui génère les outils graphiques dont il est question dans ce polycop.

Le premier, très opérationnel bien que limité à des formes simples, ne traite que du résultat visible (ombres portées) ou numérique, mais n'apporte aucune explication sur le phénomène lui-même. Quant au second outil, il ne peut servir qu'à ceux qui connaissent déjà les possibilités offertes par les outils graphiques, qui restent donc l'objet central du cours.

D'autres outils spécialisés existent ailleurs, citons notamment "SOLENE" mis au point par le Laboratoire CERMA à l'EA de Nantes, qui est capable en particulier de dessiner l'évolution diurne d'une "tâche solaire".

- Contrôle de la lumière

En ce qui concerne la lumière naturelle, citons un outil de calcul du "facteur de lumière du jour" très facile d'emploi mais dont la fonction est limitée au calcul de l'éclairement naturel sur un plan horizontal: "LESO-DIAL", mis au point par l'E.P.F.L. (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne).

A l'opposé, "RADIANCE", en accès libre et dont dispose l'Ecole d'Architecture de Marseille est un logiciel de synthèse d'images traitant de manière réaliste (parce que calculée) des éclairagements des surfaces par n'importe quelles sources lumineuses. L'usage de ce logiciel est délicat et nécessite une formation préalable assez musclée, et sa mise en œuvre est longue pour qui veut un diagnostic rapide.

Les outils graphiques:

Ces outils reposent sur le principe de la représentation angulaire de l'espace et permettent de répondre surtout à la question du "Quand": Quand une surface est-elle éclairée par le soleil à travers des masques ?

l'espace intégral, vu par un observateur situé au sol, ou vu par une façade d'inclinaison quelconque, ne peut être représenté que par une projection angulaire, à l'instar de la cartographie à l'échelle d'un hémisphère terrestre.

La course apparente du soleil obéit à la même règle et sa position se repère par deux angles, exactement comme la position d'un navire lorsqu'il se déplace à la surface de l'océan.

L'énergie solaire reçue par un plan dépend encore d'angles (incidence) représentables dans la projection en question.

Les luminances du ciel, c'est à dire les quantités de lumière apportées par la voûte céleste, sont, elles aussi, représentables par ces mêmes angles.

Enfin, les éléments de l'environnement qui font obstacle à la transmission de l'énergie solaire ou de la lumière, ou qui font office de protection, présentent des profils apparents que l'on peut aussi traduire en angles solides.

L'outil graphique choisi est basé sur la "projection sphérique zénithale", également compatible avec les images saisies par un objectif "fish-eye".

L'ensemble des outils comprend donc les diagrammes solaires (positions du soleil dans le ciel), les diagrammes iso-énergie reçue par des plans d'inclinaisons diverses, et les diagrammes de tracé des horizontales. L'usage de ces outils permet de dire où se trouve le soleil dans le ciel à une date et une heure données, comment un plan "voit" la course du soleil, ce qui revient à savoir quand il est en "ombre propre" et quand il est "éclairé" (et quelle énergie il reçoit alors). Enfin, il est possible de voir quand un plan est totalement ou partiellement dans l'ombre portée par un masque voisin, en fonction de la latitude et de l'orientation que l'on peut faire varier à volonté.

Un autre usage de ces outils permet de déterminer la forme et la dimension qu'il faut donner à un masque ou un écran solaire, en partant d'un programme de protection solaire ou de "captage" solaire défini a priori.

Savoir utiliser ces outils constitue l'objectif pédagogique principal de ce cours; la valorisation, basée sur le diagnostic d'une référence architecturale, permet de vérifier si cet objectif est atteint.

CHAPITRE 1

Contrôle de l'ensoleillement

Pour plus de clarté, il est nécessaire de distinguer entre les effets thermiques de l'ensoleillement, qui dépendent de la totalité du spectre du rayonnement solaire (c'est à dire englobant les rayonnements infra-rouge, visible et ultra-violet) et les effets lumineux qui ne dépendent, eux, que de la partie visible de ce spectre.

L'autre différence est le temps: l'énergie solaire entrant dans un local se transforme en chaleur qui peut être stockée par les masses thermiques internes du bâtiment, pour être restituée plus tard: le processus *Absorption-Stockage-Restitution* doit être analysé dans le temps. Par contre, les phénomènes lumineux sont exclusivement instantanés.

Cependant, un point commun subsiste entre ces deux parties: la représentation angulaire de l'espace. Les rayons solaires proviennent de la voûte céleste, et arrivent sous des angles d'incidence très divers. Pour mesurer cette incidence, il faut maîtriser la représentation angulaire de l'espace. Représenter les phénomènes angulaires sur une feuille de papier revient à utiliser des projections. Le problème à résoudre est le même que celui de la cartographie: la Terre étant sphérique, comment projeter sa surface sur un plan?

Ici la question est: "*Comment projeter sur un plan ce qui se passe sur la sphère fictive dont l'observateur est le centre?*".

Il existe principalement deux méthodes de projection: la projection cylindrique, et la projection sphérique.

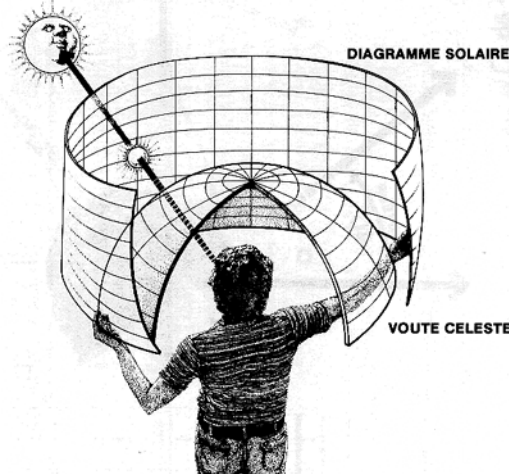


Fig. 1: Comparaison des deux projections angulaires: la cylindrique et la sphérique (d'après Mazria).

Nous n'en utiliserons qu'une. Pour diverses raisons, ce sera la projection sphérique.

1-1. Course apparente du soleil en projection sphérique

La projection utilisée pour la représentation de l'espace est la "projection sphérique équidistante". Elle correspond fidèlement à la vision à travers un objectif "fish-eye". C'est aussi celle qui est utilisée dans les "Géodes" parisiennes (La Villette et la Défense) et du Futuroscope (salle "Omnimax"). La grande différence est que dans ces salles spécialisées, la projection de l'image sphérique se fait sur un écran lui-même sphérique, ce qui restitue la réalité angulaire totale sans déformation. Revenons à la projection d'une image sphérique sur un plan.

Pour la représentation de la course apparente du soleil dans le ciel, on utilise cette projection en l'axant sur le zénith, d'où la dénomination finale de "*projection sphérique équidistante zénithale*". On pourrait bien sûr

utiliser un autre axe, en particulier un axe horizontal, mais cela nécessiterait deux vues pour couvrir la course apparente du soleil dans sa totalité.

Rappelons qu'à tout instant, la position du soleil se repère sur un hémisphère fictif constituée par le plan horizontal passant par les yeux de l'observateur, et ayant pour centre cet observateur. Ce repérage se fait au moyen de deux angles:

- la **hauteur**, angle vertical, qui est aussi l'inclinaison du rayon solaire;
- l'**azimut**, angle horizontal, qui est donc la direction sur le plan horizontal de la demi-droite ayant pour origine l'observateur et passant par la projection du soleil sur le plan horizontal, mesuré à partir d'une origine déterminée, par exemple le Nord géographique.

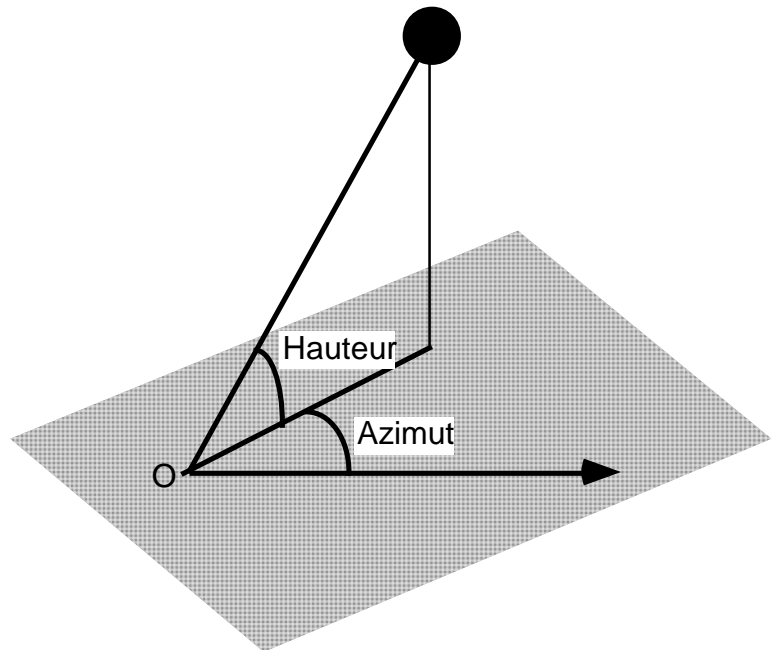


Fig. 2: Repérage de la position du soleil dans l'espace

1-1.1 Caractéristiques de la projection sphérique zénithale:

- le cercle extérieur représente l'horizon, lieu des points de l'espace vus sous une hauteur nulle (fig. 3);
- le centre du cercle représente le zénith, point dont la hauteur angulaire est égale à 90° (fig. 3);

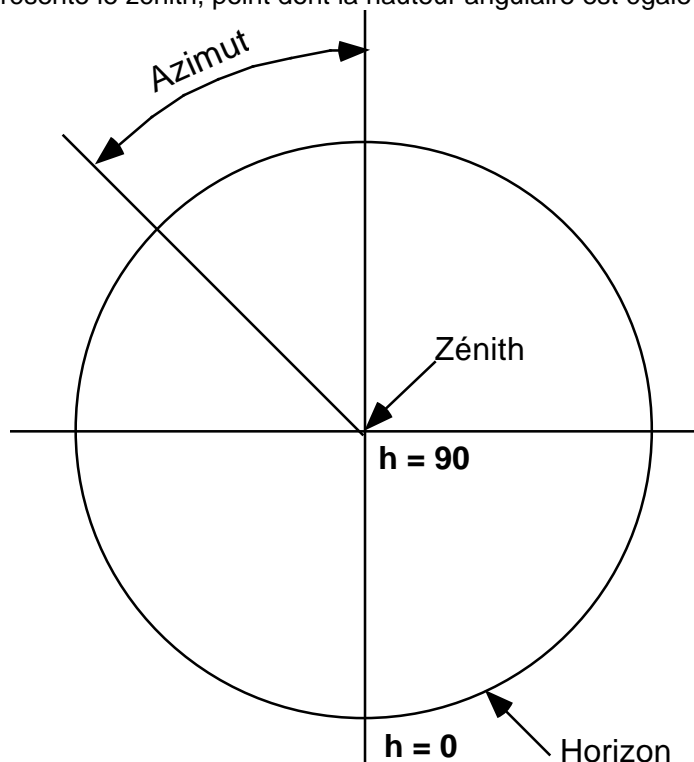


Fig.3: Projection sphérique: positions de l'horizon et du zénith.

- les cercles concentriques intermédiaires représentent les iso-hauteurs, lieux des points d'égale hauteur, de 10 en 10° ; les hauteurs sont donc croissantes en partant de l'horizon vers le zénith (fig. 4);
- les azimuts sont des angles dont le sommet est le centre du cercle: ils sont vus en vraie grandeur (fig. 4);

- deux aires égales à l'intérieur du cercle représentant l'hémisphère correspondent à deux angles solides égaux.

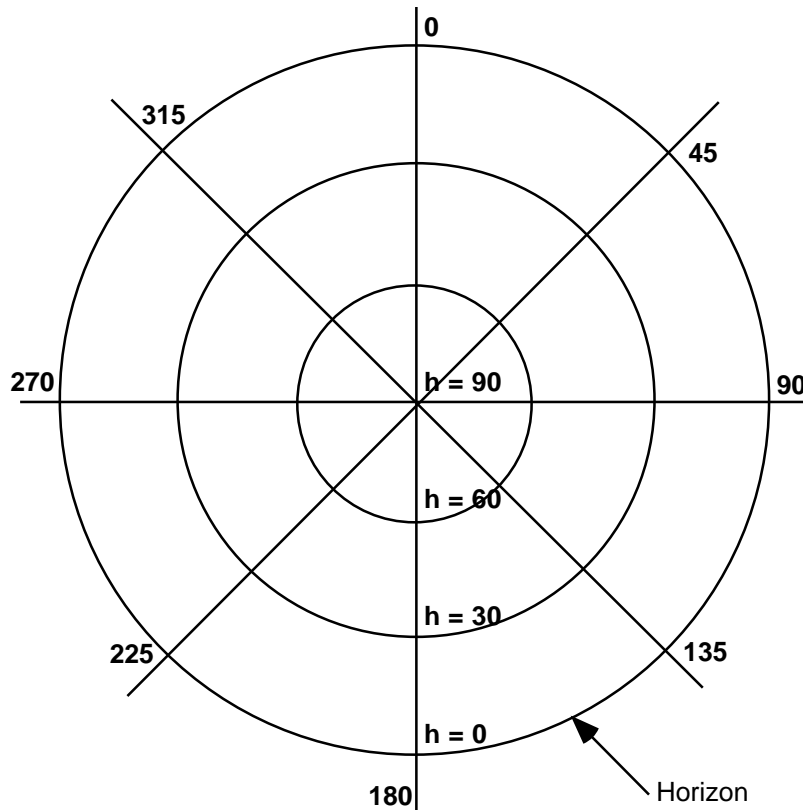


Fig. 4: Iso-hauteurs et azimuts en projection sphérique équidistante: dans cette forme simplifiée, les iso-hauteurs vont de 30 en 30°, et les azimuts de 45 en 45°.

1-1.2. Construction simplifiée du diagramme solaire:

En absence de formules générales donnant en fonction de la date, de l'heure et de la latitude le couple de valeurs hauteur-azimut (de telles formules existent, elles sont données en annexe), il est possible de mettre en place des repères permettant d'approcher la forme générale du diagramme solaire.

Le point de départ est donné par la hauteur du soleil à 12h le jour de l'équinoxe (21 Mars-21 Septembre). On peut démontrer facilement que ce jour-là et à cette heure-là, la hauteur du soleil est égale au complémentaire de la latitude ($90 - \text{LAT}$).

Par exemple, pour Marseille (Latitude = 43°), la hauteur à 12h à l'équinoxe est égale à:

$$h = (90 - 43) = 47^\circ.$$

On sait encore qu'à l'équinoxe, le soleil se lève à l'EST et se couche à l'OUEST, ce qui donne deux autres points à la course du soleil ce jour-là. La courbe est représentée par un arc de cercle.

Au sujet des directions cardinales, il faut noter qu'en visant le zénith, lorsqu'on a le Nord en haut de la feuille, l'OUEST se trouve à droite et l'Est à gauche; c'est donc l'inverse de la vue en plan. Mais on peut par convention mettre l'Est à droite et l'Ouest à gauche, en considérant que l'on regarde la sphère fictive sur laquelle se projettent les positions du soleil depuis le haut, à la même manière d'un plan d'architecte. Les diagrammes solaires en annexe peuvent avoir l'Est à droite et l'Ouest à gauche.

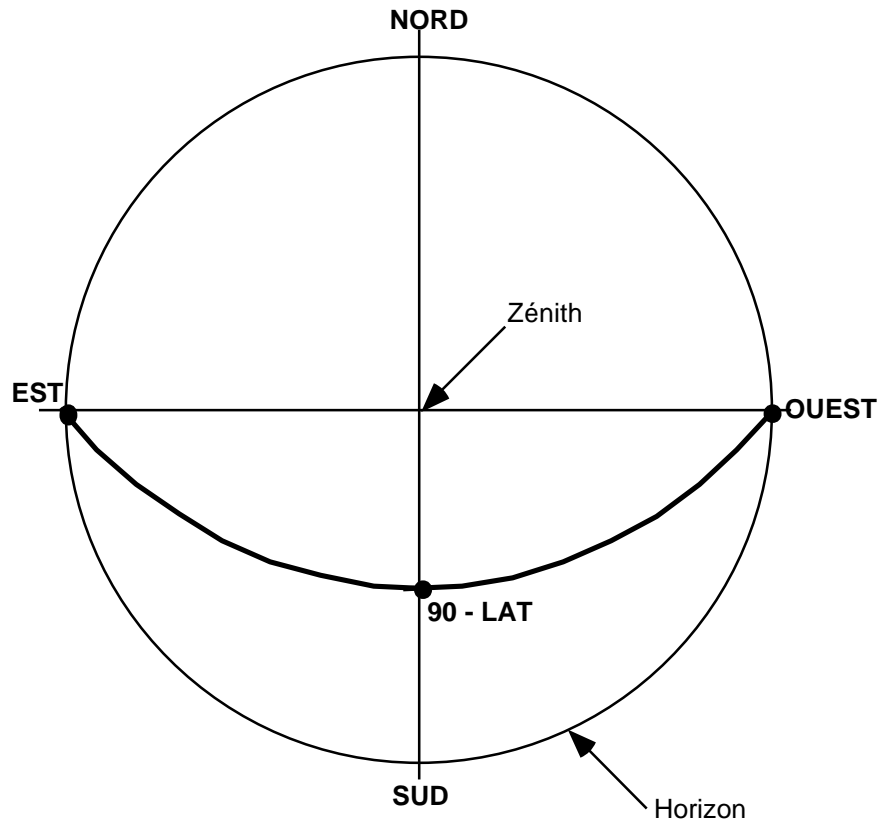


Fig. 5: Diagramme solaire simplifié: mise en place de la course de l'équinoxe pour une latitude "LAT".

Aux solstices, cette hauteur se déduit de la précédente, en ajoutant ou retranchant $23^{\circ}27'$, valeur de la déclinaison:

- Solstice d'hiver (21 Décembre) : hauteur à 12h; $h = (90 - LAT) - 23^{\circ}27'$
Pour Marseille: $h = 90 - 43 - 23^{\circ}27' = 23^{\circ}33'$
- Solstice d'été (21 Juin): hauteur à 12h; $h = (90 - LAT) + 23^{\circ}27'$
Pour Marseille: $h = 90 - 43 + 23^{\circ}27' = 70^{\circ}27'$

Pour les latitudes remarquables, les hauteurs du soleil à 12h sont les suivantes:

LATITUDE	Solstice d'hiver	Equinoxe	Solstice été
0 (équateur)	$66^{\circ}33'$	90°	$113^{\circ}27'$ (ou $66^{\circ}33'$)
$23^{\circ}27'$ (tropique)	$33^{\circ}06'$	$66^{\circ}33'$	90°
$66^{\circ}33'$ (cercle polaire)	0°	$23^{\circ}27'$	$46^{\circ}54'$
90° (pôle)	$-23^{\circ}27'$	0°	$23^{\circ}27'$

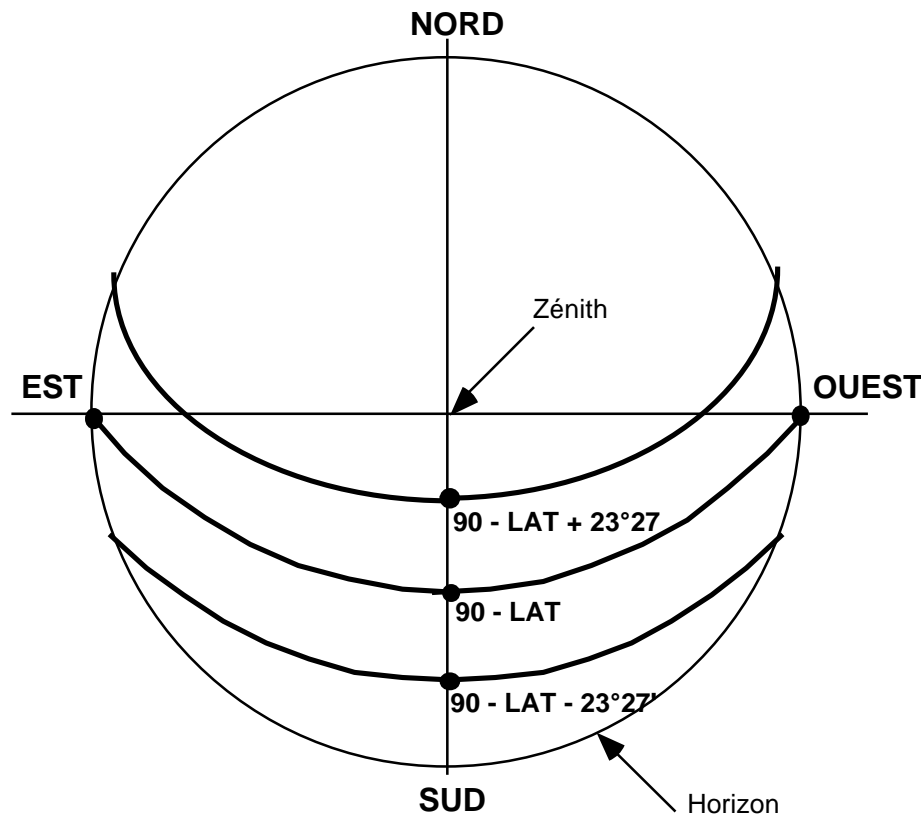


Fig. 6: Diagramme solaire simplifié: construction des courses apparentes des solstices

Les autres courbes sont grossièrement parallèles à celle de l'équinoxe; en tout cas, ces courbes ne sont en aucun cas séquentes.

1-1.3. Diagrammes solaires:

Les diagrammes solaires comportent les informations suivantes (fig. 7):

- course apparente du soleil tous les 20 du mois, de Décembre, Janvier-Novembre, Février-Octobre, Mars-Septembre, Avril-Août, Mai-Juillet et Juin.
- positions horaires du soleil, indiquant la durée du jour
- positions en azimut du lever et du coucher.

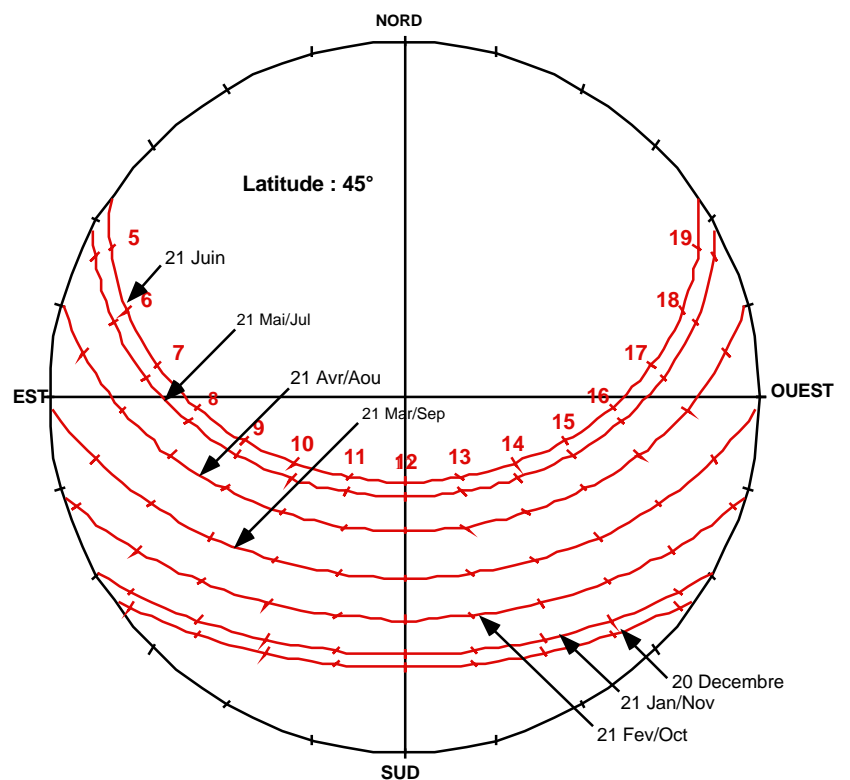


Fig. 7: Diagramme solaire de la Latitude 45°NORD: courses mensuelles avec indication des positions horaires.

Les coordonnées angulaires se retrouvent par lecture directe. sur le diagramme:

- les hauteurs par interpolation entre les cercles porteurs de l'iso-hauteur,
- les azimuts par la mesure de l'angle formé par le rayon passant par la position du soleil et l'origine des azimuts, en général, le NORD (Fig. 8).

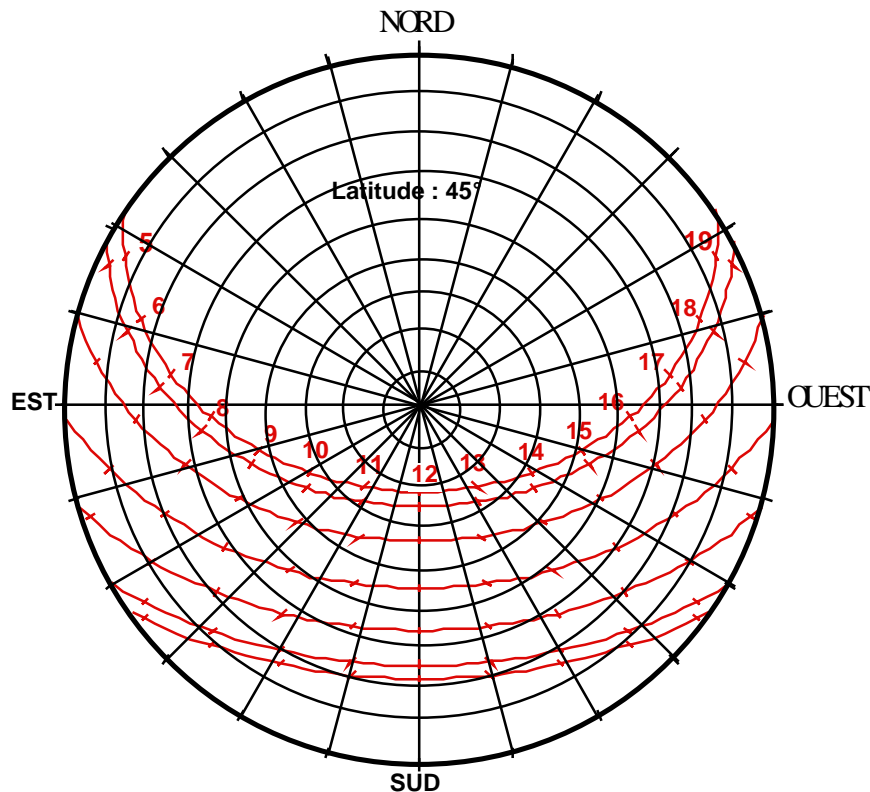


Fig. 8: Diagramme de la Latitude 45°N complet avec les iso-hauteurs de 10 en 10° et les azimuts de 15 en 15°.

1-1.4. Commentaires sur les courses apparentes du soleil:

De l'analyse des diagrammes solaires (figures 9 & 10) de diverses latitudes on peut tirer les conclusions suivantes:

- Sauf à l'équateur, et par extension, aux latitudes proches de l'équateur, la durée du jour est très variable pendant l'année: Plus on va vers le pôle, et plus les différences se creusent entre les durées de jour d'été et d'hiver.
- En été le jour s'allonge en allant vers le pôle; en hiver, il s'allonge en allant vers l'équateur. Par symétrie, on peut aussi dire qu'en été, les nuits sont plus longues en allant vers l'équateur (donc vers le SUD en hémisphère Nord), et plus courtes en allant vers le pôle (donc vers le NORD en hémisphère Nord). Ou encore: en hiver, les jours allongent en allant vers le SUD, et diminuent en allant vers le NORD.
- Le soleil ne se lève à l'EST et ne se couche à l'OUEST que deux fois par an, aux équinoxes. Le reste de l'année, les azimuts des levés et des couchers s'écartent de ces directions, d'autant plus que l'on s'approche du pôle, d'autant moins que l'on s'approche de l'équateur.
- Si l'on partage l'hémisphère fictif de l'observateur en deux moitiés (ce sont alors des quarts de sphère) selon un plan vertical EST-OUEST, le soleil passe de l'autre côté de ce plan en été:
 - la moitié de la journée dans les latitudes sub-cercle polaire;
 - en début et fin de journée dans les latitudes intermédiaires;
 - toute la journée dans les latitudes intertropicales.

Latitude : 0°0
Équateur

Jours : A = 21 Juin
B = 21 Mai/Jul
C = 21 Avr/Aou
D = 21 Mar/Sep
E = 21 Fev/Oct
F = 21 Jan/Nov
G = 20 Dec
12H00

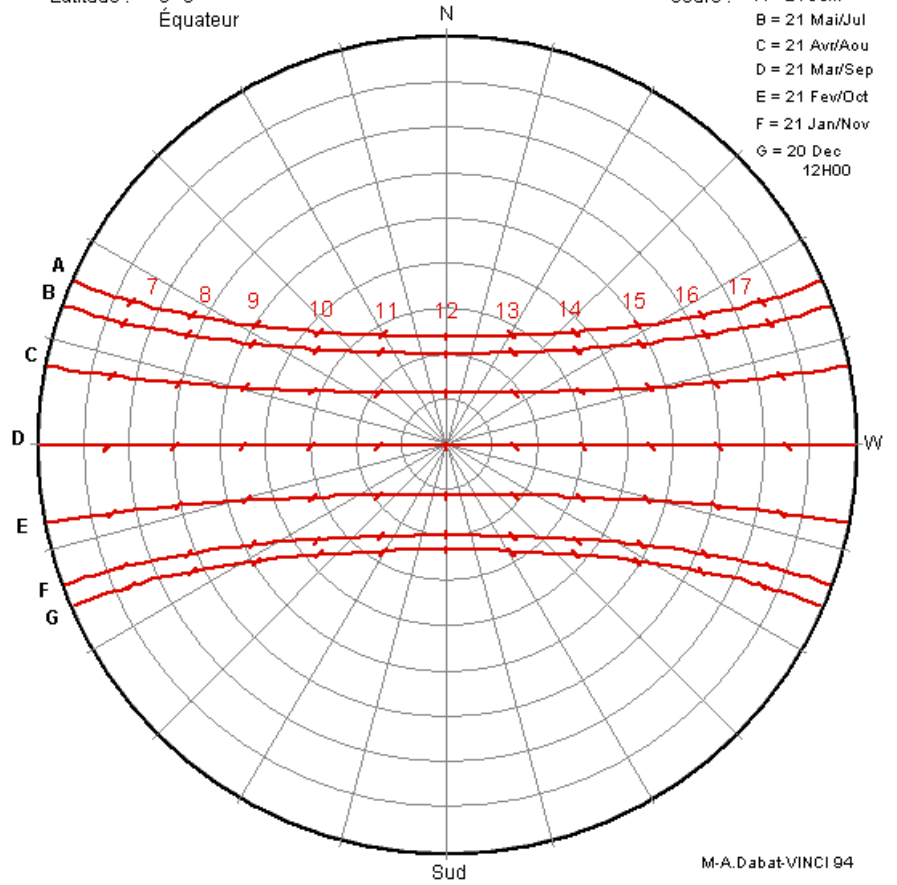


Fig. 9: Diagramme solaire de la latitude 0° (équateur): la moitié de l'année, le soleil évolue dans le quart de sphère opposé à celui de l'autre moitié de l'année, la durée du jour est de 12h

Latitude : 66° 33'
Cercle polaire

Jours : A = 21 Juin
24H00
B = 21 Mai/Jul
19H50
C = 21 Avr/Aou
15H50
D = 21 Mar/Sep
12H00
E = 21 Fev/Oct
8H00
F = 21 Jan/Nov
4H00

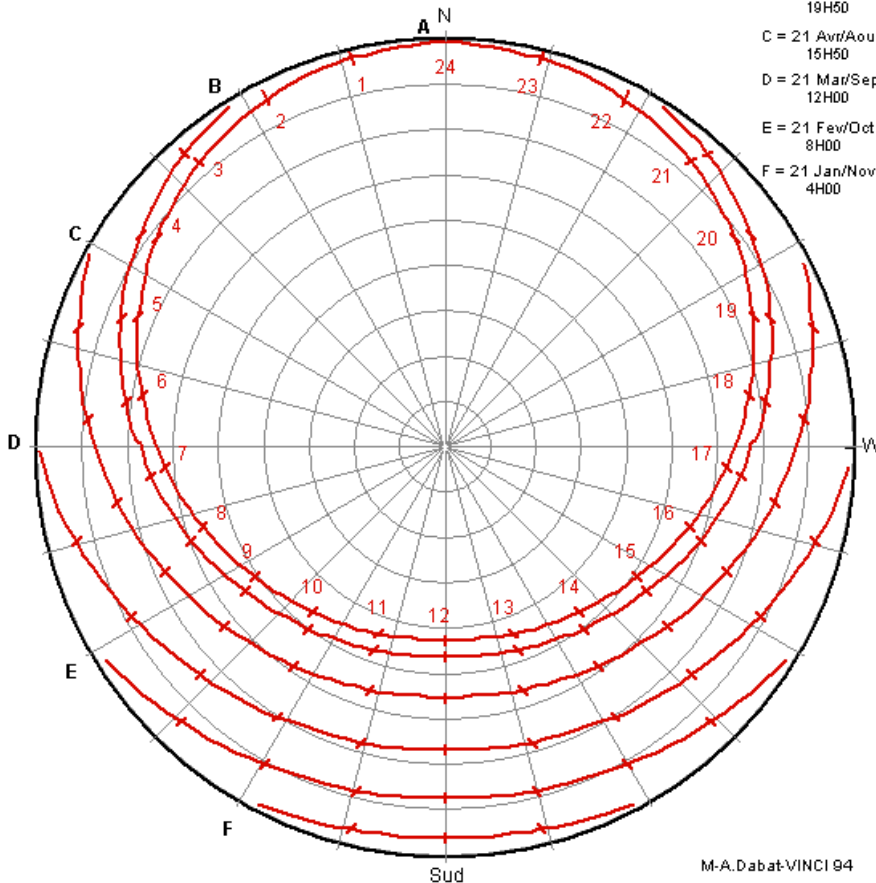


Fig. 10 : Diagramme solaire de la latitude 66°33Nord (cercle polaire)
Particularité : au solstice d'été, le soleil ne se couche pas...

1-2. Visibilité et énergie ou rayonnement lumineux solaire reçu par un plan

Le diagramme solaire est la représentation d'un phénomène céleste pour un observateur à la surface de la terre. Qu'en est-il de ce que voit un plan de ce phénomène ?

La réponse est déjà connue pour un plan horizontal: c'est le diagramme solaire lui-même.

Mais il en va différemment pour les autres plans: vertical, incliné.

1-2.1. Visibilité du plan vertical:

Le plan vertical ne voit que la moitié de ce que voit le plan horizontal, donc la moitié de l'hémisphère ainsi la représentation de la visibilité du plan vertical est donc un demi-cercle.

Logiquement, le "profil" du plan englobe le zénith (fig. 11).

La normale au plan est donc une horizontale, pointant à l'horizon dans un azimut de 90° par rapport au profil du plan. Cette normale sert à choisir l'orientation du plan vertical, par coïncidence de la normale et d'une direction azimutale ou cardinale du diagramme solaire.

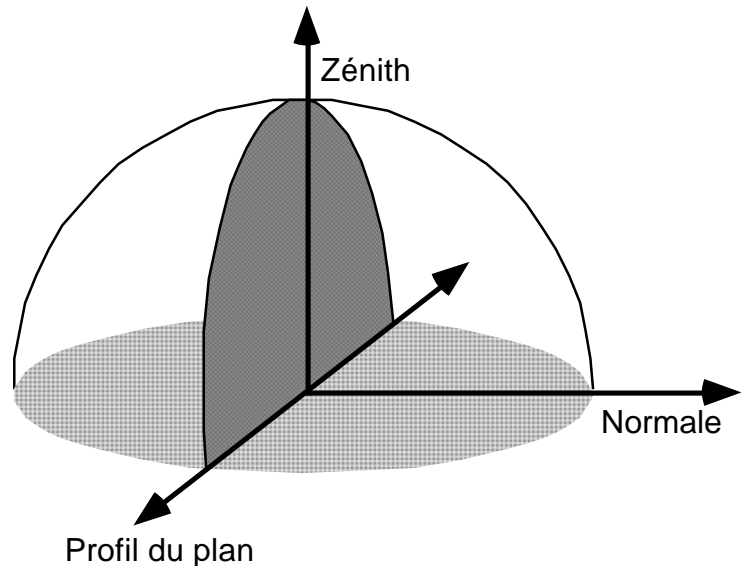


Fig. 11: Visibilité du plan vertical : profil du plan et normale au plan.

La représentation angulaire de la visibilité du plan vertical se présente donc toujours sous la forme d'un demi-cercle; l'autre demi-cercle correspond à ce qui est non vu (fig. 12).

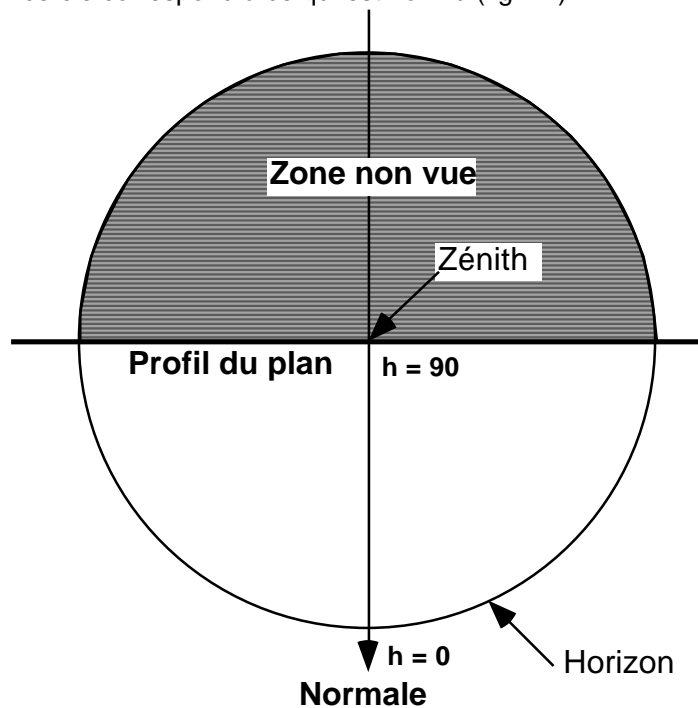


Fig. 12: Représentation sphérique zénithale de la visibilité du plan vertical

Eclairement solaire du plan vertical:

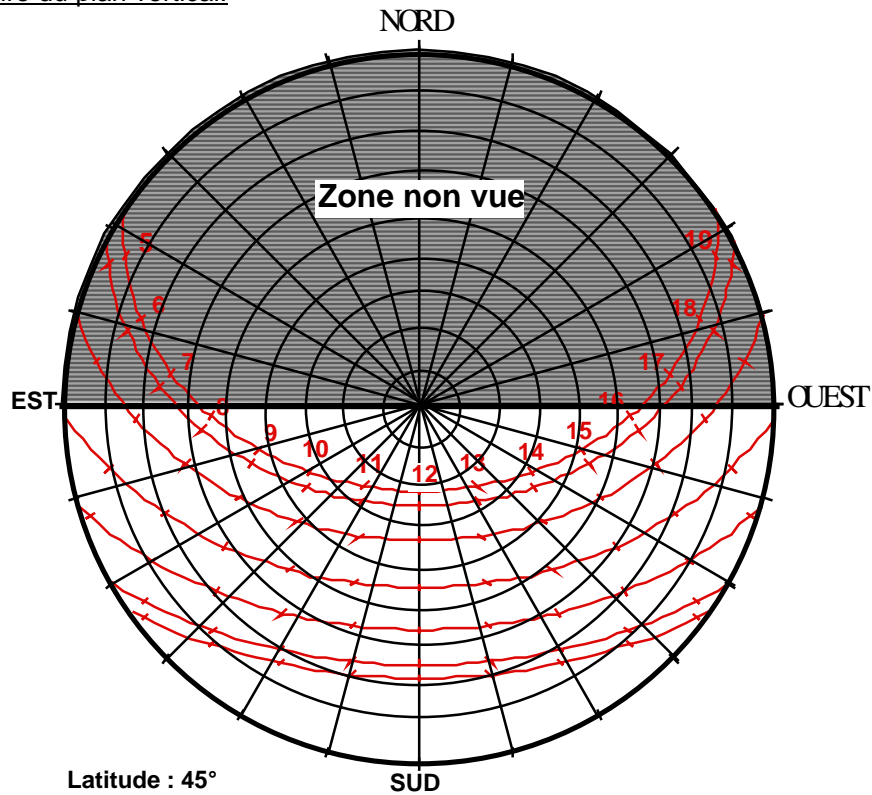


Fig. 13: Eclairement du plan vertical SUD sous la latitude 45°Nord.

La superposition de la visibilité avec un diagramme solaire donne déjà des indications sur la manière dont un plan vertical reçoit l'ensoleillement.

Par exemple, en orientation SUD et pour la latitude 45°, le plan vertical ne "voit" le soleil en été que de 8h à 16h. (de 5 à 8h et de 16 à 19h, le soleil éclaire le plan vertical orienté au NORD) (fig. 13).

On peut ainsi "compter" (évaluer) l'ensoleillement théorique que reçoit ce plan sur l'année :

Juin	8h
Mai/juillet	9h
Avril/Août	10h
Mars/Septembre	12h
Février/Octobre	10h
Janvier/Novembre	9h
Décembre	8h

Premier constat : ce n'est pas en été (jours les plus longs) que l'éclairement solaire d'une façade sud est le plus grand.

On peut s'apercevoir que avec une autre orientation, pour la même latitude, que l'éclairement solaire sera différent suivant les saisons : façade est ou ouest, par exemple.

Remarque : une façade orientée au NORD reçoit un éclairement solaire non négligeable au printemps et en été, et cela plus on s'approche des latitudes septentrionales

1-2.2. Visibilité du plan incliné

La situation du plan incliné est intermédiaire entre le plan vertical et le plan horizontal; sa visibilité est donc celle du plan vertical augmentée d'un "croissant".

Cette zone supplémentaire de visibilité est constituée par la deuxième moitié du cercle, amputée d'une "zone non vue", dont la hauteur maximale est égale à l'inclinaison du plan. (fig. 14).

Fig. 14: Visibilité du plan incliné en projection sphérique équidistante zénithale.

La normale au plan incliné d'un angle α vise un point de l'espace sous une hauteur apparente complémentaire de l'inclinaison ($90 - \alpha$). Par exemple un plan incliné à 30° vise un point de hauteur 60° .

Eclairement solaire d'un plan incliné:

Prenons par exemple un plan incliné à 60° orienté au NORD, sous la latitude 45° . On peut voir qu'en été, ce plan est éclairé toute la journée par le soleil, malgré son orientation NORD (Fig. 15).

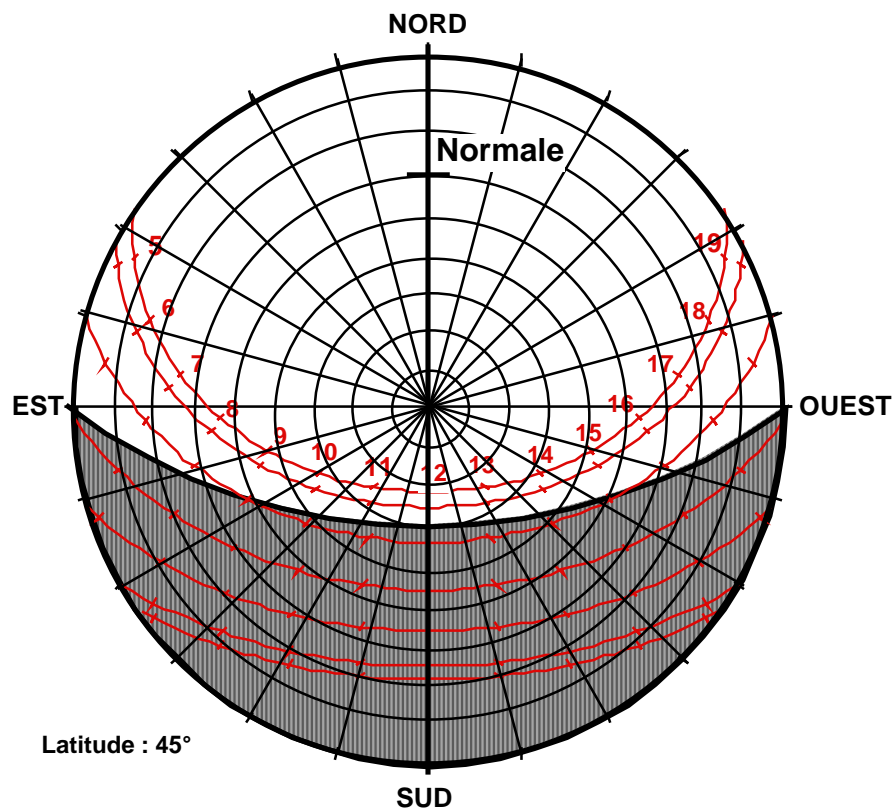
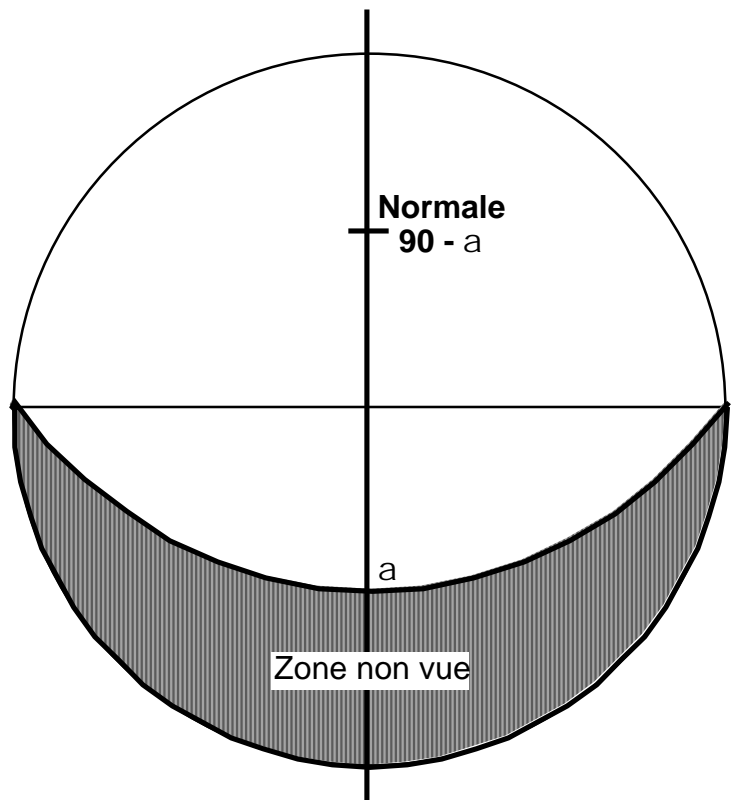


Fig. 15: Eclairement solaire d'un plan incliné à 60° sous la latitude 45° N en orientation NORD: l'éclairement est permanent pendant les 3 mois d'été.

1-2.3. Energie solaire reçue par le plan horizontal:

Pour tout plan, l'énergie solaire reçue à un instant est proportionnelle:

- au sinus de la hauteur du soleil au dessus de l'horizon (à cause de l'épaisseur de l'atmosphère que les rayons ont à traverser) d'une part ,
- au cosinus de l'angle d'incidence du rayon solaire par rapport au plan, d'autre part.

Rappelons que l'angle d'incidence est l'angle que forme le rayon avec la normale au plan. Nous savons représenter la normale à un plan en vue sphérique, nous devons donc pouvoir aussi représenter des "iso-angles d'incidence".

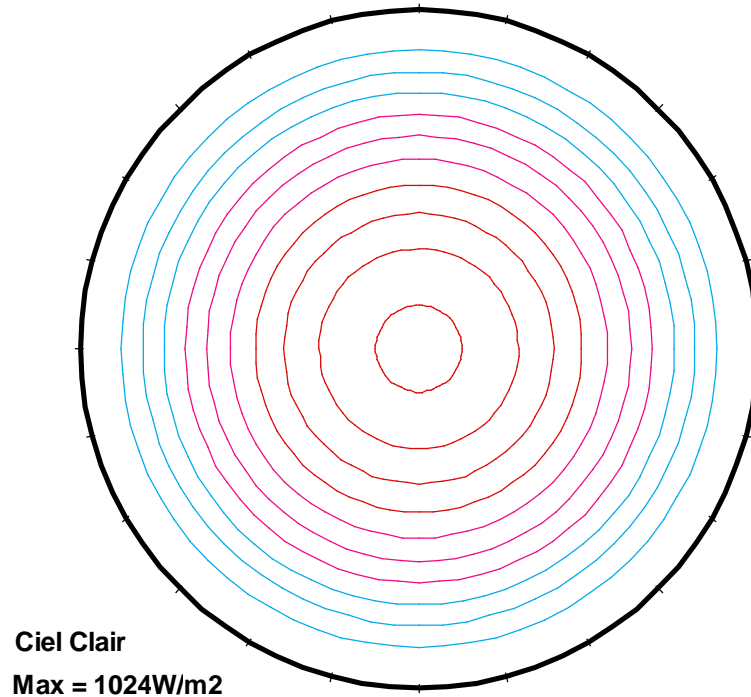


Fig. 16: Diagramme de l'énergie incidente sur un plan horizontal, conditions de "ciel clair".
L'équidistance des courbes est de 100W/m^2 .

Pour le plan horizontal, la chose est extrêmement simple: les iso-incidences sont aussi des iso-hauteurs, puisque la normale au plan est verticale (l'angle d'incidence est dans ce cas le complémentaire de la hauteur). Les courbes iso-incidences sont donc représentées par des cercles concentriques.

Les courbes iso-énergie le sont aussi puisque l'autre grandeur agissante est précisément la hauteur du soleil. Les valeurs portées par les diagrammes iso-énergie sont exprimées en W/m^2 et s'échelonnent par pas de 100W/m^2 . Ces valeurs sont universelles et ne dépendent que de l'état du ciel. On peut voir sur le diagramme que l'énergie reçue directement du soleil peut monter jusqu'à 1024W/m^2 (soleil au zénith) (fig. 16).

1-2.4. Energie reçue par le plan vertical:

Pour le plan vertical, le dessin est plus complexe (fig.17). En effet l'iso-incidence et les iso-hauteurs n'ont pas la même forme. Le résultat est donc un compromis entre les deux : une tendance au parallélisme avec l'horizon en dessous de 30° de hauteur du soleil, et une stricte dépendance de l'iso-incidence au-dessus de 30° .

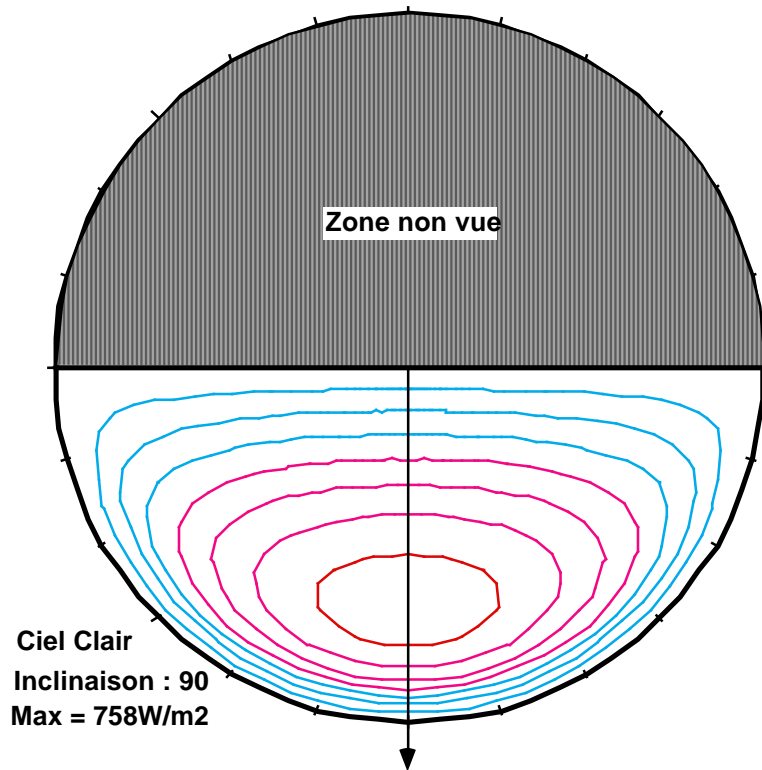


Fig. 17: Diagramme de l'énergie incidente sur un plan vertical, conditions de "ciel clair". L'équidistance des courbes est de 100W/m².

On peut constater que l'énergie reçue par un plan vertical est plafonnée à 750W/m².

Par exemple, un plan vertical SUD sous la latitude 45° reçoit le maximum d'énergie en hiver (d'octobre à février) entre 11h et 13h (> 700W/m²).

Par contre, en été, la valeur maximale est de l'ordre de 350 W/m² vers midi (fig. 18).

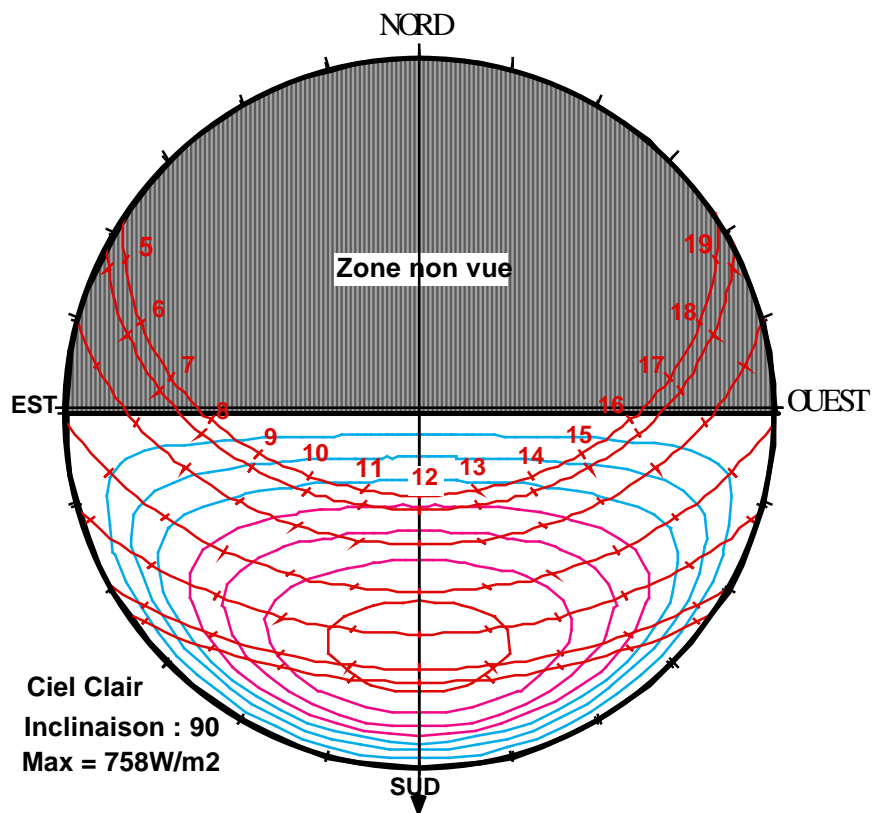


Fig. 18: Eclairage énergétique du plan vertical orienté au SUD sous la latitude 45°N.

Un plan vertical OUEST reçoit le maximum d'énergie en été entre 16h et 18h ($>600 \text{ W/m}^2$) et ne reçoit en hiver que 300 W/m^2 vers 14-15h. Ce bilan est l'inverse de celui de l'orientation SUD.

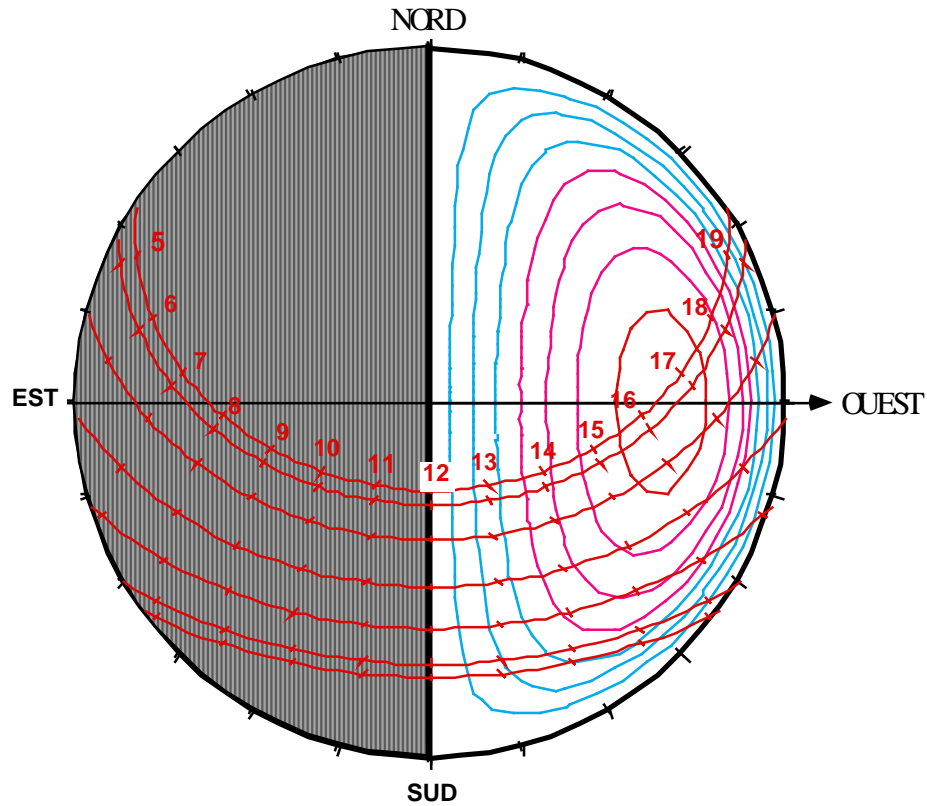


Fig. 19: Eclairage énergétique du plan vertical orienté à l'OUEST sous la latitude 45°N .

1-2.5. Energie reçue par un plan incliné:

La zone de visibilité d'un plan incliné est plus grande que celle du plan vertical et la puissance maximale reçue est également plus importante: elle reste bien sûr intermédiaire entre celle du plan vertical et celle du plan horizontal.

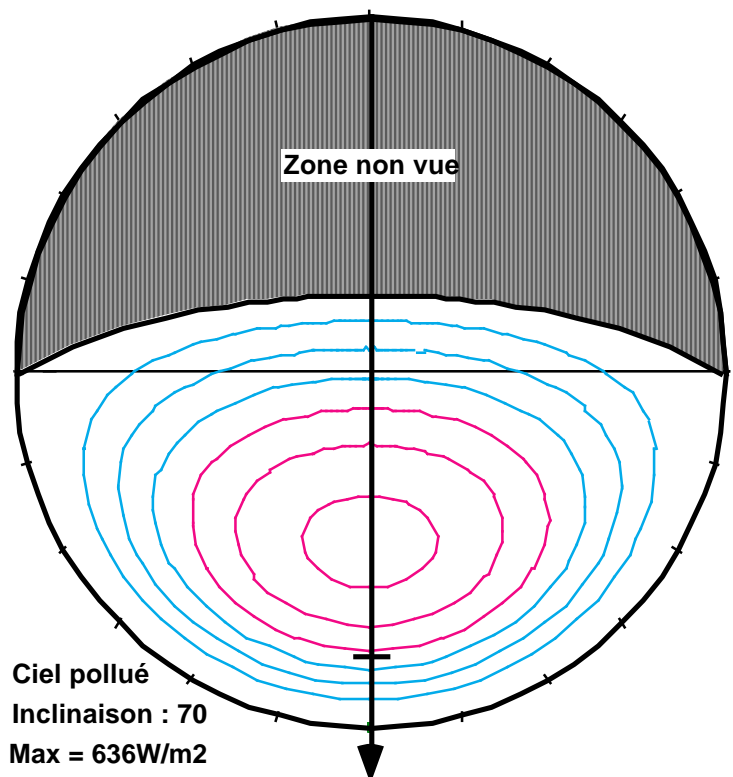


Fig. 20: Diagramme énergétique du plan incliné à 70° pour un ciel "pollué" (type urbain): du fait de l'état de ce ciel, la puissance maximale n'atteint que 636 W/m^2 .