

UNE PROJECTION SYNTHÉTIQUE POUR LA CONCEPTION ARCHITECTURALE AVEC LA LUMIÈRE DU SOLEIL

Benoit Beckers (*), Luc Masset (**) & Pierre Beckers (**)

(*) AVENUES Research Laboratory, GSU Department,
Compiègne University of Technology, France

(**) Aerospace & Mechanical Engineering Department
Institut de Mécanique et Génie Civil (B52)
www.heliodon.net

Benoit.Beckers@utc.fr, Luc.Masset@ulg.ac.be, Pierre.Beckers@ulg.ac.be

RESUME

Dans de nombreux pays, on impose des normes d'illumination naturelle très sévères, tant pour le développement urbain que pour la construction. Les projections standard de la CAO ne suffisent pas pour contrôler de manière précise les apports lumineux et énergétiques. Le programme informatique Heliodon, développé par les auteurs, offre des projections spécialisées : l'utilisateur dessine la scène dans une vue en plan avec ombrage; il peut l'étudier dans la vue 3D et, simultanément, contrôler l'illumination solaire directe sur une projection stéréographique. Cette procédure ne permet cependant pas de quantifier les alternatives de conception. C'est pour cette raison que nous proposons une projection originale que nous appelons isochrone. Elle montre sans déformation les époques de l'année pendant lesquelles le soleil est masqué par des éléments de la scène. En calculant cette période en chaque nœud d'un maillage, l'utilisateur obtient une carte décrivant la quantité d'illumination directe, pondérée par l'atténuation atmosphérique. On obtient ainsi des graphiques très synthétiques et utiles sans sacrifier aucune information géométrique.

MOTS CLEFS : projections géométriques, ensoleillement, radiation, architecture.

TITRE ORIGINAL : UNA PROYECCIÓN SINTÉTICA PARA EL DISEÑO ARQUITECTÓNICO CON LA LUZ DEL SOL

8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cusco, 23 al 25 de Octubre de 2007.

ILLUMINATION SOLAIRE

La première étape du calcul de l'illumination solaire est de connaître la position du soleil à tout instant dans le repère local de l'observateur. Observé à partir d'un point de la terre, le mouvement du soleil est essentiellement basé sur deux rotations. La première a une longue période, un an, et un grand rayon, une unité astronomique, soit environ 150 millions de kilomètres. La seconde a une période courte, un jour, et se réalise autour de l'axe nord-sud de la sphère terrestre. Les deux axes sont respectivement perpendiculaires au plan de l'écliptique et au plan de l'équateur terrestre. Ce sont ces mouvements que nous allons définir dans ce qui suit.

MOUVEMENT DE LA TERRE AUTOUR DU SOLEIL

La terre tourne autour du soleil en un an, soit 365.25 jours. Sa trajectoire autour du soleil se réalise dans le plan de l'écliptique, qui est incliné de 23.5 degrés par rapport au plan équatorial terrestre. En astronomie, ces hypothèses ne sont pas suffisantes pour obtenir des données de position précises, car il faut tenir compte du fait que la trajectoire terrestre est elliptique. Cela conduit à tenir compte de l'équation du temps et à résoudre l'équation de Kepler. Dans le cadre de la conception du projet architectural, l'approximation circulaire n'affecte pas les choix à effectuer.

La position du soleil est donc donnée par sa position angulaire sur une trajectoire supposée circulaire. Cette position peut être rapportée à des jours en établissant l'équivalence entre une année et un cercle de 360 degrés. Elle est donc définie par la formule suivante, où d est le numéro du jour de l'année.

$$i = (d / 365.25) 360^\circ - 90^\circ \quad (1)$$

L'origine des angles est adaptée de telle façon que l'angle vaut 0° lors du passage au point vernal, c'est-à-dire à l'équinoxe de printemps (21 mars).

En coordonnées cartésiennes, dans le plan de l'écliptique, les coordonnées cartésiennes du soleil sont données par la relation suivante où, comme la distance est mesurée en unité astronomique, c'est-à-dire la distance moyenne de la terre au soleil, le rayon est égal à un. Dans cette équation, comme on n'étudie que deux corps, on peut aussi bien considérer que le soleil tourne autour de la terre. Sa position est donnée par le vecteur P_s .

$$P_s = [\cos i \quad \sin i \quad 0.] \quad (2)$$

L'axe nord-sud de la terre, par définition perpendiculaire au plan équatorial, a une direction constante. Il pointe vers l'étoile polaire et est incliné de 23.5 degrés. Cet axe peut être représenté par le vecteur N :

$$N = [0. \quad \sin 23.5^\circ \quad \cos 23.5^\circ] \quad (3)$$

En effectuant le produit scalaire de ces deux vecteurs, on trouve le cosinus de l'angle entre la direction du soleil et l'axe de rotation de la terre.

$$\cos \frac{\pi}{2} - \delta = \sin 23.5^\circ \sin i \quad (4)$$

Le complément de cet angle est ce qu'on appelle la déclinaison du soleil. Dans l'équation (4), elle est exprimée en radians et calculée pour chaque jour de l'année. C'est aussi la hauteur angulaire du soleil au dessus du plan équatorial lors de son passage dans le méridien de référence.

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \arcsin (\sin i \sin 23.5^\circ) \quad (5)$$

On en déduit le graphique de la figure 1, donnant le nombre de jours pendant lesquels le soleil se trouve à midi à une hauteur de $\pm n$ degrés. Ces données sont réparties sur 92 colonnes, centrées sur $0^\circ, 1^\circ, \dots, 23^\circ$. On parcourt ainsi les 92 déclinaisons du soleil mesurées en angles entiers, avec en rouge et bleu respectivement, les solstices d'été et d'hiver. En ce qui concerne la hauteur du soleil, on remarque sur le graphique de la figure 1 que trois jours sont pratiquement suffisants pour décrire l'ensemble de l'année : les solstices et un jour d'équinoxe (aux positions de zéro degrés).

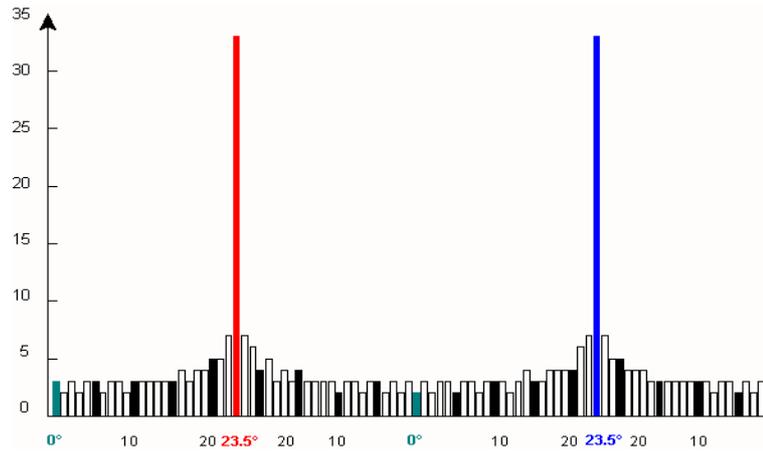


Fig. 1 : Nombres de jours pour différentes déclinaisons du soleil

Le soleil reste beaucoup plus longtemps dans la région des solstices que dans celle des équinoxes. Cela se remarque sur la projection stéréographique des trajectoires solaires, même si les distances entre trajectoires n'y sont pas vues en vraie grandeur.

POSITION DU SOLEIL DANS LE REPÈRE LOCAL

La terre tourne sur elle-même en 24 heures. La position du soleil dépend de cette rotation représentée par l'heure. Considérons donc trois vecteurs pointant du centre de la sphère terrestre vers trois points de sa surface, respectivement vers le pôle nord N , vers le soleil S et vers le zénith du point étudié P où se trouve l'observateur. L'angle entre N et S est par définition le complément de la déclinaison du soleil $90^\circ - \delta$, équation (5). Rappelons que cet angle varie au cours de l'année entre -23.50° et $+23.5^\circ$, positions aux solstices d'hiver et d'été. Le décalage horaire correspond à l'angle entre le méridien de l'heure et celui de midi : $15(t-t_0)$ (le coefficient 15 est exprimé en $^\circ/h$, degrés par heure et t en heures). L'angle entre N et P définit la colatitude $90^\circ - \varphi$. Nous calculons tout d'abord l'angle entre la verticale locale P et la direction du soleil S , soit donc : ψ appelé angle zénithal. On l'obtient simplement en utilisant la formule classique des triangles sphériques (Beckers, 2003).

$$\cos \psi = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos[15(t-t_0)] \quad (6)$$

On déduit de cette formule, par exemple, qu'à l'équateur ($\varphi = 0$), tous les jours ont la même longueur. En effet, lorsque le soleil est sur l'horizon, $\psi = 90^\circ$ et on vérifie que $t = \pm 6$ heures. A l'heure du midi solaire, ($t = t_0$), on peut calculer la relation entre l'angle zénithal, la latitude et la déclinaison du soleil : $\psi = \varphi - \delta$.

Reste maintenant à définir l'azimut du soleil, c'est-à-dire sa direction par rapport au méridien local. C'est l'angle ζ de la même figure 2. On reprend la formule des triangles sphériques, en supposant connu l'angle ψ .

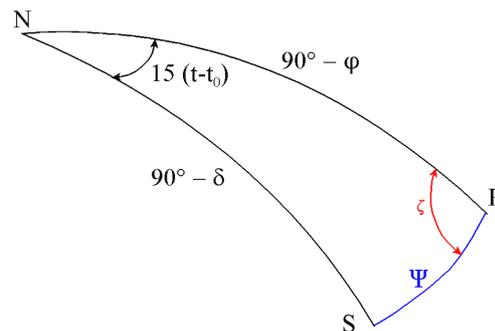


Fig. 2 : Positions sur la sphère

$$\sin \delta = \sin \varphi \cos \psi + \cos \varphi \sin \psi \cos \zeta \quad (7)$$

On obtient donc :

$$\cos \zeta = \frac{\sin \delta - \sin \varphi \cos \psi}{\cos \varphi \sin \psi} \quad (8)$$

La formule doit être éventuellement ajustée suivant l'origine et le sens du comptage des angles. En reprenant le diagramme solaire stéréographique, on vérifie aisément qu'en été, à l'équateur, le soleil est sur l'horizon aux azimuts $\zeta = \pm 66.5^\circ$ mesurés à partir du nord. Pour une latitude de $\pm 90^\circ$, le résultat est indéterminé.

DIAGRAMME ISOCHRONE

A l'aide des équations (6) et (8), on peut calculer la position du soleil tout au long de l'année pour un lieu géographique donné. C'est ce que montre la figure 3. On porte en abscisse les angles exprimés en heures et en ordonnée le jour de l'année, (équation (1)). Les courbes indiquent les hauteurs angulaires du soleil $90^\circ - \psi$ obtenues à partir de l'équation (6). Lorsqu'on parcourt ce graphique horizontalement, on voit défiler un jour. Par contre si on le parcourt verticalement, on voit défiler une année à une heure fixe. Si on mettait ce graphique à une échelle adéquate, chacun de ses points représenterait une heure.

Comme indiqué précédemment (figure 1), puisque la déclinaison du soleil est quasiment fixe pendant les mois qui entourent les solstices, sa hauteur angulaire à midi est aussi quasiment constante. On le voit à gauche au solstice d'été pour un point situé sur le tropique du Capricorne et à droite au solstice d'hiver pour un point situé à Ushuaia (Argentine).

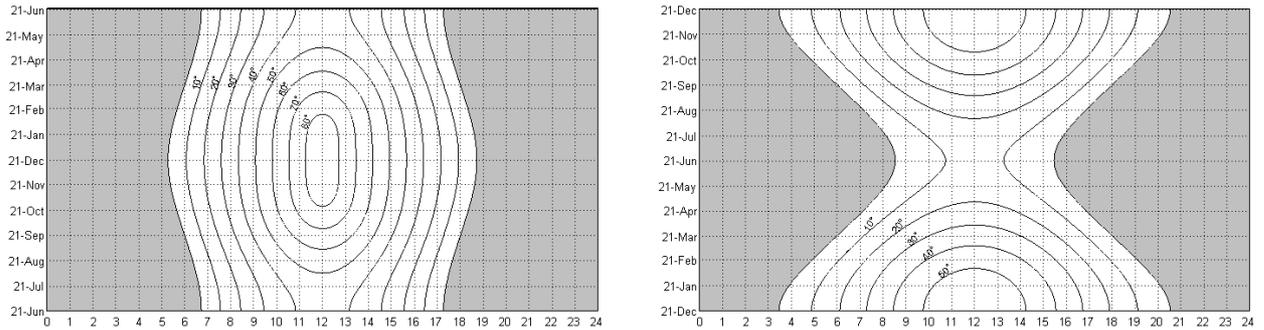


Fig. 3 : Isochrones centrées sur un solstice – Tropique du Capricorne - Ushuaia

INFLUENCE DE L'ATMOSPHERE

Selon son inclinaison, le rayon solaire traverse une épaisseur variable de l'atmosphère. Au dessus de celle-ci, l'intensité du flux radiatif solaire dans la bande de fréquence d'intérêt vaut S_{p0} . Le flux qui arrive en un point de la terre peut s'écrire (Campbell & Norman, 1998):

$$S_p = S_{p0} \tau^m \quad (9)$$

Le terme τ représente la transmittance de l'atmosphère tandis que le facteur m est le nombre de masse optique de l'air, c'est-à-dire : le rapport entre le trajet actuel dans l'atmosphère et le trajet zénithal. En général, on prend $\tau = 0.7$ et $S_{p0} = 1380 \text{ W/m}^2$. Si l'angle ψ est inférieur à 80° , les phénomènes de réfraction sont négligeables et m est défini par la relation :

$$m = \frac{p_a}{101.3 \cos \psi} \quad (10)$$

Selon cette loi, le flux maximum est obtenu pour un rayon vertical. Au niveau de la mer, il vaut $0.7 * 1380 \text{ W/m}^2$, soit 966 W/m^2 .

Le rapport $p_a / 101.3$ est égal à la pression atmosphérique au point d'observation divisée par la pression au niveau de la mer. Les pressions sont exprimées en kPa. La pression 101.3 kPa est la pression atmosphérique dite normale. Elle correspond à une atmosphère. Ce rapport corrige les effets d'altitude. La pression atmosphérique p_a est généralement définie par la loi :

$$p_a = 101.3 e^{\frac{-\text{altitude}}{8.2}} \quad (11)$$

L'altitude est exprimée en kilomètres. Dans le diagramme de la figure 4, on compare la pression calculée, en rouge, à des données normalisées de la référence (OAC) en bleu. On voit que les deux courbes sont identiques jusqu'à une altitude de près de cinq kilomètres. A 5000 mètres d'altitude, la pression chute de moitié.

Effectuons une comparaison de l'absorption atmosphérique calculée à partir de l'équation (9). Dans le graphique de la figure 5, on représente en ordonnée le pourcentage de transmission et en abscisse l'angle zénithal ψ du rayon solaire. Ce résultat est représenté en noir. On voit aussi qu'à une altitude de 4000 mètres la transmission verticale passe de 70% à 80%, c'est la courbe rouge.

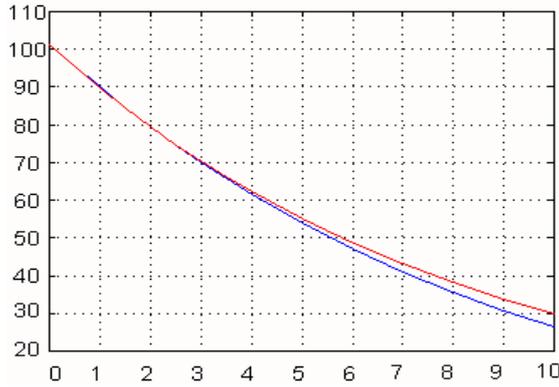


Fig. 4 : Pression atmosphérique en kPa, en fonction de l'altitude en km.

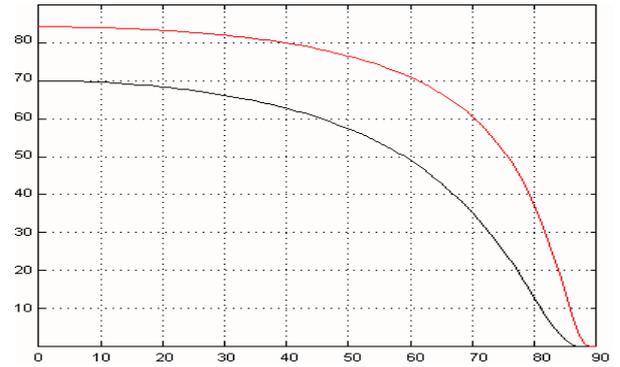


Fig. 5 : Coefficient d'absorption atmosphérique à 0 m et à 4000 m d'altitude.

En un point situé à l'équateur, on voit, sur le diagramme isochrone de la figure 6, que le facteur de transmission est supérieur à 60% depuis environ 9 h 30 jusqu'à 14 h 30. Cette transmission de 60% correspond à une hauteur solaire supérieure ou égale à 45° (fig. 5). En accord avec le diagramme de la figure 5, les isovaleurs de la puissance reçue sont plus étalées autour du maximum que celles de la hauteur angulaire du soleil.

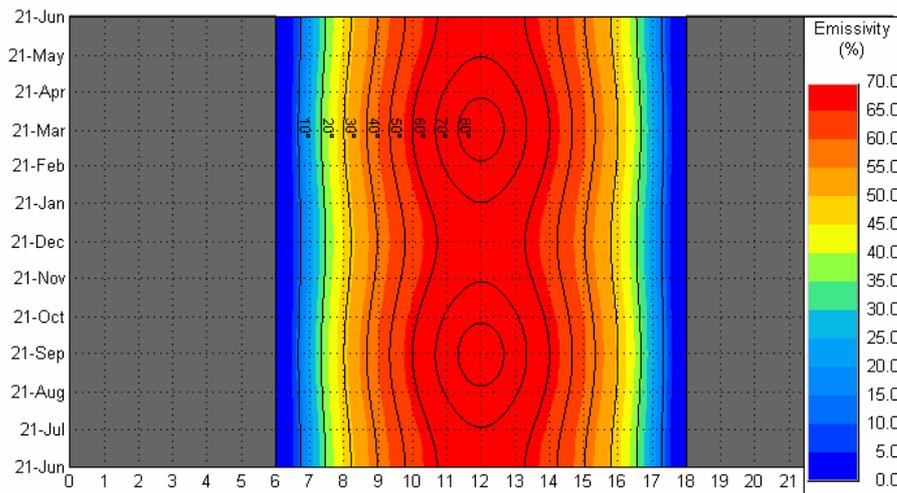


Fig. 6 : La transmission du rayonnement solaire à l'équateur

En multipliant ce facteur par la puissance exoatmosphérique $S_{p0} = 1380 \text{ Wm}^{-2}$ et en intégrant sur le temps, on obtient le flux d'énergie qui atteint le point considéré. On l'exprime fréquemment en kWh/m^2 . Dans ce calcul, on ne tient pas compte de la direction du flux. Cela signifie que si l'on veut capter l'énergie il faut disposer d'un récepteur adéquat, par exemple un panneau solaire qui s'oriente constamment perpendiculairement au flux. Cette énergie est la valeur maximum qu'on peut obtenir en un point.

L'intégration temporelle peut être effectuée sur des périodes définies à la fois sur un intervalle horaire et sur un intervalle de jours. Si on intègre sur l'année complète, la somme des périodes diurnes est partout égale à la somme des périodes nocturnes et vaut une demi-année, soit 4383 heures. A l'équateur, tous les jours sont égaux (fig. 6). Aux pôles, il y a un seul jour et une seule nuit qui se partagent l'année.

Il est intéressant de comparer les valeurs annuelles rapportées à une seule journée, le total étant divisé par 365.25. L'énergie varie quasiment d'un facteur deux entre l'équateur et le pôle, comme indiqué dans la colonne 3 de la table 1. Mais les ensoleillements sont très différents selon les latitudes. Ainsi, à la ligne correspondant à l'équateur, on voit que l'énergie est assez constante, sa variation maximum étant de 5% entre les solstices et les équinoxes.

Cette variation augmente significativement avec la latitude et, à Ushuaia, par exemple, la variation entre l'hiver et l'été est supérieure à un facteur 10. On remarque aussi que la puissance diminue avec la latitude, très

fortement en hiver, de manière similaire à la moyenne de l'année au moment des équinoxes. Au pôle, la valeur est nulle entre l'équinoxe d'automne et celui de printemps (nuit polaire).

En été par contre, le fait que l'incidence du rayon solaire diminue avec la latitude est plus que compensé par l'augmentation de la longueur des jours et, conséquence inattendue, c'est au pôle qu'on reçoit le maximum d'ensoleillement journalier au solstice d'été.

Dans les deux dernières lignes du tableau, nous examinons ce qui se passe dans deux villes situées en altitude et nous observons des augmentations significatives. Celles-ci peuvent mieux s'apprécier lorsqu'on calcule pour les endroits précédents ce qui se passerait à 4000m d'altitude. C'est ce qui est repris dans la dernière colonne du tableau.

Table 1 : Energies reçues en fonction de la latitude et de l'altitude

Energies en kWh/m ²	latitude	Moyenne et (année)	21 juin	21 septembre	21 décembre	21décembre (4000m)
Equateur	0°	8.18 (2989)	7.99	8.39	7.99	10.1
Trop. Capricorne	23°30' S	7.77 (2839)	5.84	8.02	9.29	11.6
Concepción	36°46' S	7.12 (2601)	4.04	7.38	9.77	12.3
Ushuaia	54°48' S	5.61 (2048)	0.83	5.84	10.3	13.3
Cercle antarctique	66°30' S	4.54 (1657)	0.	4.11	10.7	14.5
Pôle sud	90° S	4.01 (1466)	0.	0.	13.5	19.1
Cuzco (3400 m)	13°32' S	9.87 (3604)	8.66	10.1	10.7	
La Paz (4000 m)	16°30' S	10.1 (3690)	8.65	10.3	11.2	

Nous venons de comparer les situations en différents points du globe en nous limitant à l'examen de trois jours caractéristiques. On peut justifier cette procédure en réalisant le calcul suivant.

A Ushuaia, le 21 décembre, entre 9 et 15 heures, la puissance reçue est de 5.30 kWh/m². Si on examine les 20 jours (du 11 au 30 décembre) ou les 40 jours (du 1 décembre au 9 janvier) qui entourent cette date, on obtient quasi exactement 20, ou 40 fois la valeur du 21 décembre. Notons que si nous examinons le jour complet, c'est-à-dire des périodes de temps qui varient de jour en jour, nous passons pour le 21 décembre de 5.30 kWh/m² à 10.3 kWh/m². Cependant, en considérant de nouveau 20 ou 40 jours, les résultats sont aussi 20 ou 40 fois plus élevés. Au cercle polaire, on peut tirer des conclusions similaires. Cette constance de la puissance reçue aux dates proches des solstices confirme l'observation faite plus haut à propos de la figure 1.

Tout ce qui vient d'être évoqué s'applique à un paysage plan et dépourvu de toute végétation ou relief. Dans la pratique, le soleil est souvent masqué par des objets naturels ou des constructions. Il convient donc d'introduire leur géométrie. Cela se réalise selon les méthodes classiques de projection et de détection des surfaces visibles. Dans ce calcul, il est très pratique d'effectuer au préalable une projection sur la sphère. Ensuite, en suivant la même méthode que celle qui est utilisée pour le calcul de la position du soleil, on peut reporter les masques sur le diagramme isochrone (Beckers *et al.* 2007).

Le fait de vouloir utiliser un programme de simulation très interactif comme « Heliodon 2 » (Beckers *et al.* 2006), utilisé ci-après, introduit cependant une contrainte très forte qui demande de rechercher les algorithmes les plus performants et de les implanter avec le plus grand soin (Beckers *et al.* 2005).

PRISE EN COMPTE DE LA GEOMETRIE

Pour l'ensemble de bâtiments de la figure 7 et au point indiqué par les lignes en pointillé, le diagramme isochrone donne le résultat de la figure 8.

De ce point d'observation, on ne voit jamais le soleil pendant la période proche du solstice d'hiver. Pour des points proches de celui qui a été choisi, la tour centrale joue un rôle important pendant toute l'année en milieu de journée. Le soleil étant assez haut à midi en été, $\psi = 31^\circ$, au vu du diagramme de la figure 5, la puissance reçue est presque la même qu'à l'équateur. Même si la vue en stéréographie (figure 9) permet d'observer les heures d'illumination, seul le diagramme isochrone permet de les quantifier (fig. 8). Remarquons cependant que l'utilisation simultanée de ces deux graphiques permet de bien assimiler les conditions d'illumination solaire. En effet, sur la figure 9, on couvre l'ensemble de la voûte céleste, tandis que sur la figure 8, on ne couvre que la partie du ciel dans laquelle se déplace le soleil.

ENSOLEILLEMENT

Les diagrammes précédents nous permettent de bien connaître la situation en un point au cours du temps, mais elles ne permettent pas de faire un bilan. Celui-ci n'est possible que si on réalise une intégration temporelle. Celle-ci est facile à réaliser. En effet, si l'on « *compte les pixels blancs* » de la figure 8, on obtient le nombre d'heures d'ensoleillement pendant la période considérée. En pondérant ce comptage selon la formule (9) ou toute autre formule de ce type, on obtient une énergie ou une autre grandeur physique selon le facteur utilisé. Remarquons cependant qu'il s'agit toujours d'une grandeur scalaire et que celle-ci est évaluée en un point de l'espace sans aucune considération du récepteur éventuel de cette grandeur.

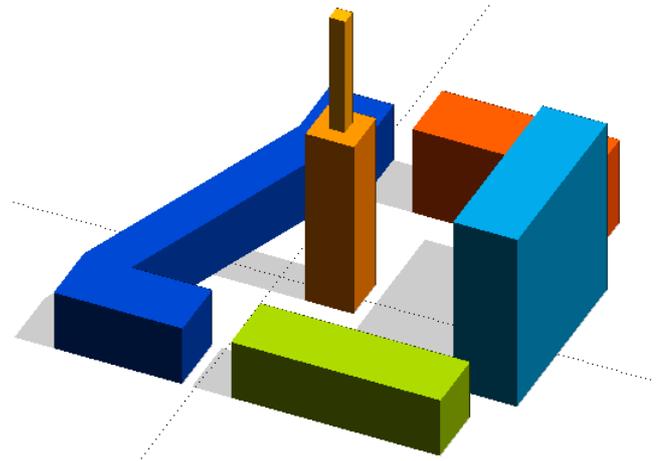


Fig. 7 : Ensemble architectural

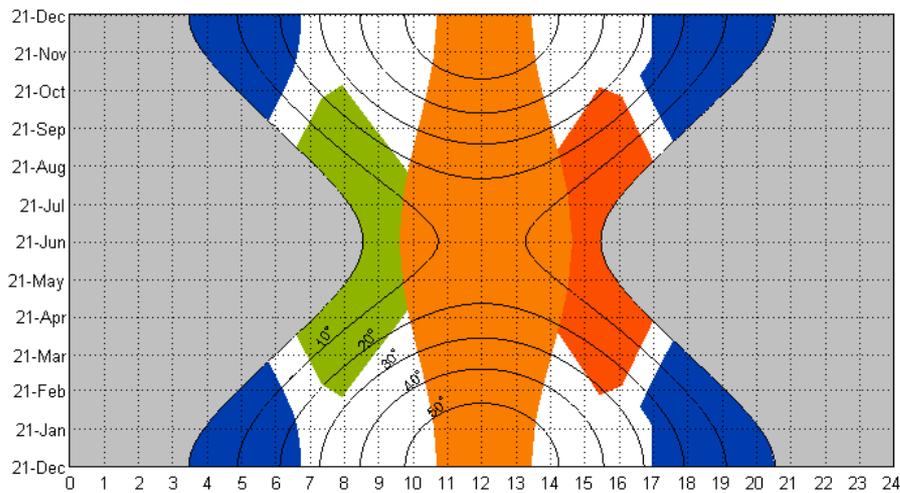


Fig. 8 : Isochrone à Ushuaia, masques et positions du soleil

Ce résultat ponctuel fournit une première indication au concepteur afin de quantifier le niveau de l'illumination. La comparaison du résultat en différents points de l'espace permet ensuite d'apprécier l'influence de la configuration géométrique.

Pour calculer la distribution de cette grandeur dans l'espace tridimensionnel, il faut reproduire le calcul aux nœuds d'une grille 3D et ensuite interpoler le résultat. Lorsqu'on souhaite le visualiser, soit on se cantonne à la frontière extérieure ou à la peau de cette grille, soit on effectue des coupes. C'est la solution choisie dans cette présentation. Cependant, afin d'accélérer les calculs, on maille directement les surfaces de coupe (en principe uniquement des surfaces horizontales ou verticales). Les graphiques d'interpolation des grandeurs étudiées fournissent ainsi les cartes souhaitées. Comme illustration, nous choisissons un problème géométrique extrêmement simple.

Un bâtiment est réduit à une plaque carrée horizontale, en brun sur la figure 10. Le calcul est effectué sur un maillage horizontal situé en dessous de la plaque et l'entourant complètement. Effectuons la comparaison des puissances reçues à Ushuaia le 21 mars (à droite) ou pendant les 20 jours entourant le 21 mars (à gauche). Comme dans l'exemple précédent de la figure 8, le rapport 1 à 20 est toujours respecté. Pour la visibilité des dessins, on a choisi des échelles différentes. On note également que les transitions sont plus nettes si on ne prend que le jour de l'équinoxe (à droite). Observons également que le diagramme est composé de bandes verticales parallèles. Si on regardait les ombres portées, on verrait qu'elles se déplacent dans un mouvement de translation parfait d'est en ouest.

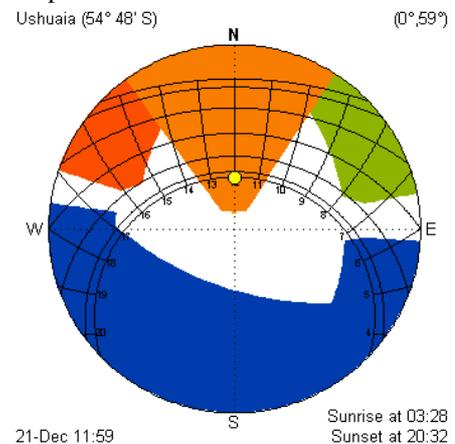


Fig. 9 : Masques et trajets solaires (Ushuaia)

Le principal intérêt de cet exemple est de montrer l'influence de la configuration géométrique sur les cartes obtenues, et ce d'autant plus que la période de temps est plus courte. En même temps, une période plus longue tend à atténuer les contrastes à cause de la variation de déclinaison du soleil.

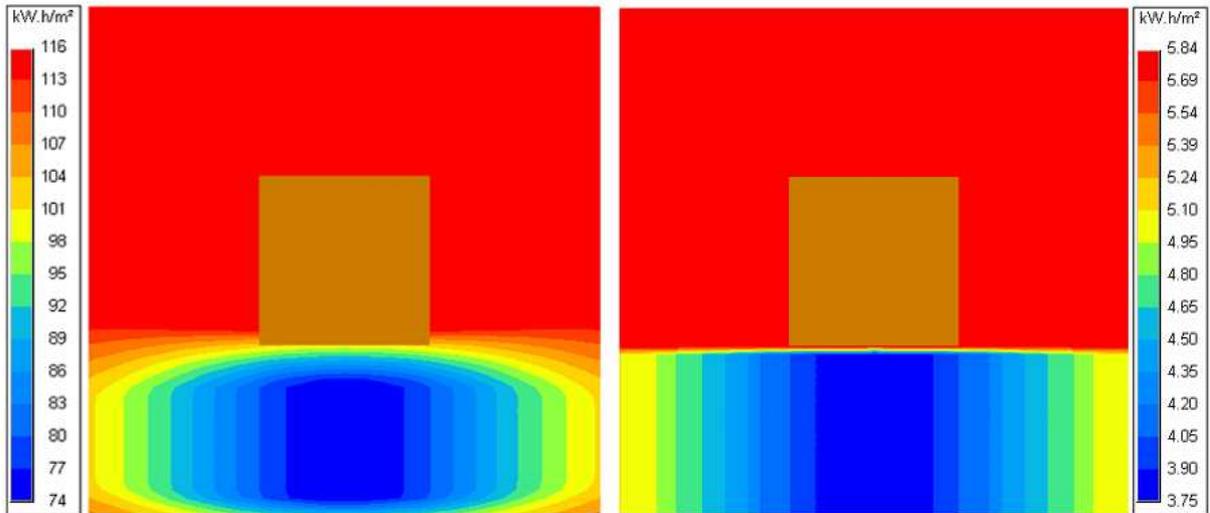


Fig.10 : Energie reçue à Ushuaia à l'époque de l'équinoxe

VARIATION DES PUISSANCES EN FONCTION DE LA LATITUDE

Comparons les puissances reçues en présence d'un bâtiment très simple : une colonne de base carrée trois fois plus haute que large. Le test s'effectue le 21 décembre sur une durée de 24 heures. On prend seulement la moitié de la scène, car il y a une symétrie est-ouest. A l'équateur, le maximum est de 8 kWh/m². A Ushuaia, il est de 10.3 kWh/m² et au cercle antarctique de 10.7 kWh/m². Cela signifie que l'ensoleillement reçu dans la zone sud n'est pas du tout affecté, à cette époque, par la présence du bâtiment (table 1). Au pôle sud, par contre, il est de 12.2 kWh/m² ; il y a donc un déficit de 10% à cause de la présence du bâtiment. On déduit donc de ce type de graphique quels sont les endroits les plus exposés ou les mieux protégés par rapport à l'ensoleillement direct.

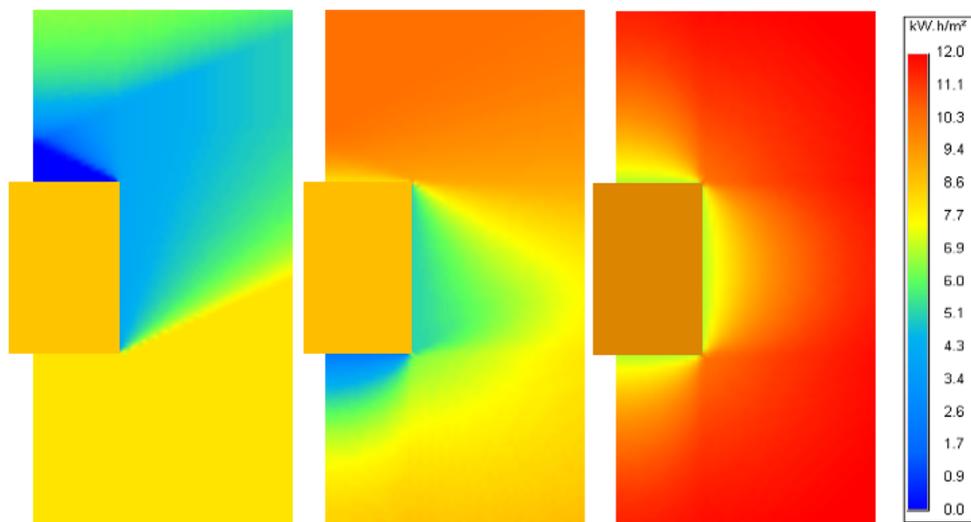


Fig. 11 : Puissance reçue par un même bâtiment situé à 0°, 54° et 90° sud, le 21 décembre.

CONCLUSION

Le diagramme isochrone présenté dans cette communication permet de visualiser dans le temps la partie de la voûte céleste sur laquelle se déplace le soleil. En se basant sur les équations de la mécanique céleste, on visualise en tout point de la terre la position du soleil à un moment précis : jour et heure. Dans cette visualisation, les intervalles de temps sont vus en vraie grandeur. En d'autres termes, chaque pixel du graphique représente le même intervalle de temps, contrairement à ce qui se passe dans la projection stéréographique.

Le premier avantage de ce procédé est que la vision temporelle des positions du soleil est quantitativement correcte. Le second intérêt de la méthode est de faciliter les intégrations temporelles obtenues par simple surfacage des zones concernées.

S'agissant de l'illumination solaire directe, il est également important de tenir compte de l'atténuation atmosphérique. En affectant les intégrations de facteurs *ad hoc*, on calcule facilement la quantité d'énergie qui arrive au point considéré.

L'introduction des masques, c'est-à-dire la prise en compte des objets qui occultent le soleil, est réalisée de manière efficace en profitant des propriétés de la projection sur la sphère pour utiliser la technique du *z-buffer*.

Une application directe de ce calcul consiste à établir une représentation de l'énergie incidente dans le volume. On la visualise par des coupes de l'espace 3D selon des plans. Le résultat dépend donc de la position géographique et de l'altitude, mais il est indépendant de tout récepteur.

L'étude de la radiation solaire dans le volume n'est pas très courante, car les spécialistes ont l'habitude de privilégier les calculs sur des surfaces réceptrices (murs, toits, panneaux solaires,...). Cependant, le calcul dans le volume offre, selon nous, le grand avantage d'une relation limpide entre la géométrie de la scène et son masquage par rapport au soleil. Nous pensons par conséquent qu'il devrait se révéler très utile pour les problèmes architecturaux et urbains complexes, comme étape intermédiaire entre les premières esquisses et le bilan thermique final (Beckers, 2005).

L'ensemble des simulations s'effectue avec un seul paramètre physique, qui est l'atténuation atmosphérique, mais en tenant compte de manière précise des données géométriques. Les exemples présentés ont un intérêt didactique évident et donnent au concepteur les moyens d'une perception objective et synthétique de l'influence de l'illumination solaire sur la conception des ensembles architecturaux.

UNITES ET NOMENCLATURE

δ	: déclinaison
φ	: latitude
ψ	: angle zénithal
ζ	: azimut du soleil
S_{p0}	: puissance exoatmosphérique = 1380W/m ²
S	: radiance solaire en Wm ⁻²
τ	: transmittance
m	: nombre de masse optique de l'air
p_a	: pression atmosphérique au niveau de la mer

REFERENCES

1. Beckers P., Communication graphique, Editions de l'Université de Liège, 2003.
2. Campbell G. S. & Norman J. M., An introduction to Environmental Biophysics, New York: Springer, second edition, 1998, ISBN 0-387-94937-2
3. Manuel de l'atmosphère type, OACI (Organisation de l'aviation civile internationale), (élargie jusqu'à 80 kilomètres (262 500 pieds)), Doc. 7488/3, édition, 1993
4. Beckers B., Masset L. & Beckers P., "Descriptive Geometry Mutating to Design Tool", *Proceeding of ICCES05 Conference*, Chennai, India, December 2005.
5. Beckers B. & Masset L., "Heliodon.2", Software and user guide, www.heliodon.net, 2006.
6. Beckers B., Masset L. & Beckers P., "Enrichment of the visual experience by a wider choice of projections", Proc. of the 2007 11th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design, April 26 - 28, 2007, Melbourne, Australia, Edited by: Weiming Shen & al, IEEE Catalog Number: 07EX1675C, ISBN: 1-4244-0963-2, Library of Congress: 2007920353
7. Beckers B., *Geometria sensible*, Thèse de doctorat, Université Polytechnique de Catalogne, Barcelone, Espagne, 2005.