11. L'énergie solaire

11.3 – L'énergie solaire disponible

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

Département de génie mécanique

Victor Aveline, M.ing.

Patrick Belzile, ing., M.ing.

Pierre-Luc Paradis, ing., M.ing.

Stéphane Hallé, M.Sc.A., Ph.D.

Question

ENR2020

- Qu’est-ce que le temps solaire?
  A. Temps basé sur le mouvement angulaire apparent du soleil à travers le ciel
  B. Temps mesuré avec midi solaire défini tel que le moment où le soleil traverse le méridien de l'observateur.
  C. Temps normal (sans heure avancée)
  D. Temps civil adopté par les Nations unies en 1956
  E. Temps basé sur le mouvement du soleil à travers le ciel entre le lever et le coucher du soleil

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Le temps solaire
- La géométrie solaire
- Conclusion

Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Le temps solaire
- La géométrie solaire
- Conclusion

Introduction et objectifs

- L’énergie solaire disponible est assez complexe (mais pas difficile) à estimer car il faut connaître à tout instant l’angle d’incidence du rayonnement qui arrive sur la surface considérée.
- Ce calcul se fait à partir d’une série d’équations et de modèles.
- Aujourd’hui ces équations sont intégrées dans des logiciels et de nombreux calculateurs existent pour estimer ce potentiel.
- Cette présentation permet de comprendre comment ont été construites les cartes du Canada de la ressource solaire.

Introduction et objectifs

- Objectifs de cette présentation
  – S'initier à la notion de temps solaire et aux calculs des angles solaires;
  – Survoler les instruments de mesure du rayonnement solaire;
  – Savoir calculer une puissance radiative incidente pour n'importe quel endroit du globe et à n'importe quel moment.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Le temps solaire***
- La géométrie solaire
- Conclusion

Temps solaire

- Pourquoi calculer le temps solaire ?
  - Pour déterminer l'angle ω qui permet de maximiser la quantité de soleil interceptée à un moment donné d'une journée pour une surface inclinée et orientée dans des directions données.
  - Solar time: *Time based on the apparent angular motion of the sun across the sky with solar noon the time the sun crosses the meridian of the observer*.
  - Temps basé sur le mouvement angulaire apparent du soleil à travers le ciel avec midi solaire le moment où le soleil traverse le méridien de l'observateur.

Temps solaire

- Équation du temps (*min*)
  - La vitesse orbitale varie pendant l'année
  - Ainsi, le temps solaire apparent varie par rapport au temps moyen mesuré par une horloge sur terre.
  - Si la durée MOYENNE d'une journée est de 24 heures, chacune d'entre elles n'a pas 24 heures.
  - E est donc une variable qui ajoute ou retranche du temps à l'heure en fonction de la vitesse variable de la terre.

Temps solaire

- Équation du temps (min)
  - Kalogirou : pas utilisée dans ce cours

$$E = 9{,}87\sin(2B) - 7{,}53\cos(B) - 1{,}5\sin(B)$$

$$B = (n - 81)\frac{360}{364} \quad [°]$$

  - Duffie et Beckman : nous utiliserons celle-ci

$$E = 2{,}2918\begin{bmatrix}0{,}0075 + 0{,}1868\cos(B) - 3{,}2077\sin(B) \\ -1{,}4615\cos(2B) - 4{,}089\sin(2B)\end{bmatrix}$$

$$B = (n - 1)\frac{360}{365} \quad [°]$$

Temps solaire

- Pour *n* le jour de l'année
- Cette table est très utile pour déterminer le jour de l'année en fonction de la date. Mais une fonction numérique le fait tout aussi bien.

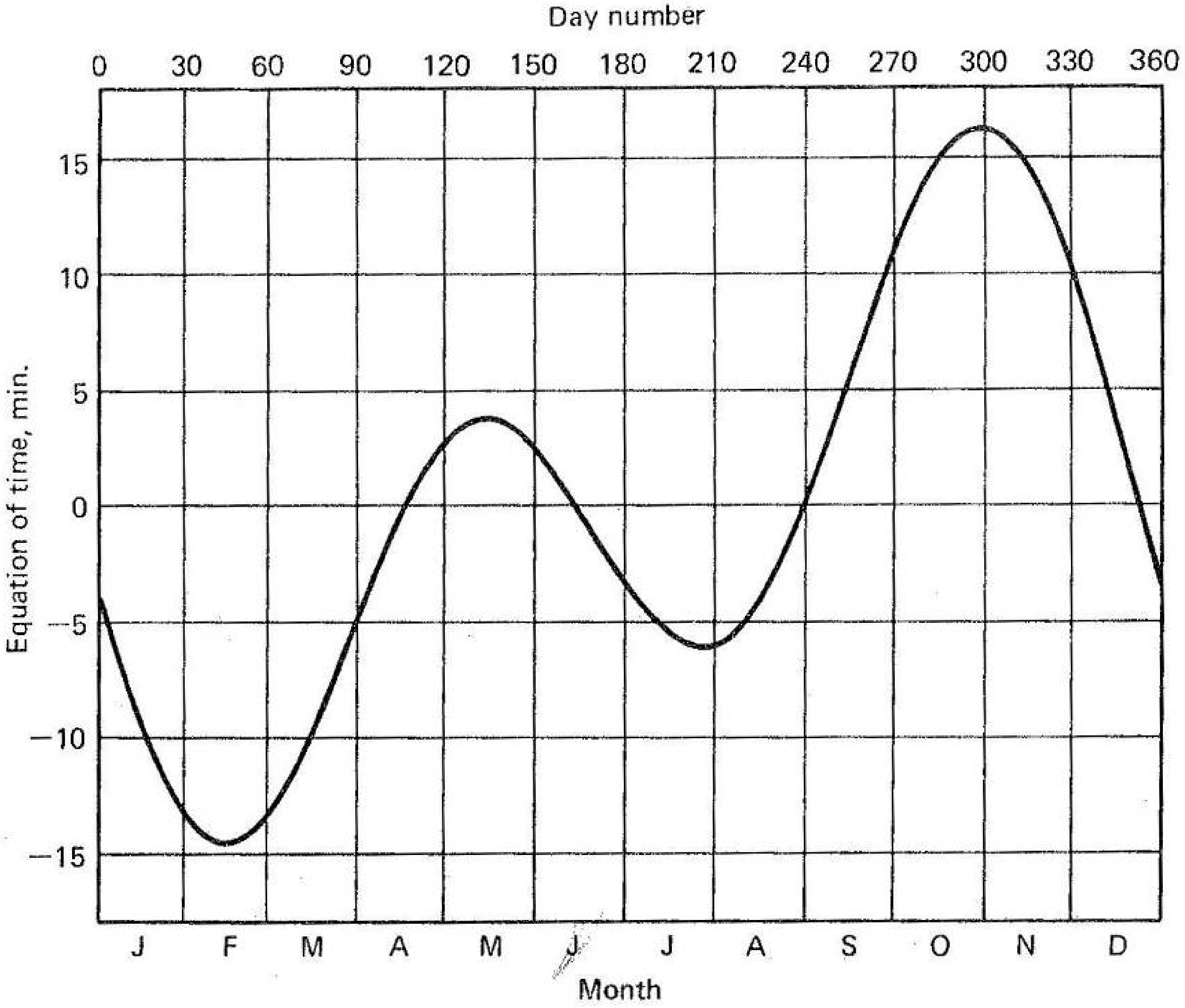
Table 1.6.1 Recommended Average Days for Months and Values of n by Months[a]

Month	n for ith Day of Month	For Average Day of Month Date	n	δ
January	i	17	17	-20.9
February	$31 + i$	16	47	-13.0
March	$59 + i$	16	75	-2.4
April	$90 + i$	15	105	9.4
May	$120 + i$	15	135	18.8
June	$151 + i$	11	162	23.1
July	$181 + i$	17	198	21.2
August	$212 + i$	16	228	13.5
September	$243 + i$	15	258	2.2
October	$273 + i$	15	288	-9.6
November	$304 + i$	14	318	-18.9
December	$334 + i$	10	344	-23.0

[a] From Klein (1977). Do not use for $|\phi| > 66.5°$.

Temps solaire

- Représentation graphique de l'équation du temps *E*.
- Cette figure est employée pour vérifier vos calculs. Remarquez que les limites en minutes sont d'environ +/- 15 minutes. Pas des heures.



Temps solaire

- Le temps local standard, T_{LS}, ou temps civil est associé à un méridien situé près du centre d'une zone de temps.
- Le temps solaire vrai (par opposition au temps solaire moyen), T_S, est aussi différent du temps standard en raison de la longitude exacte d'un lieu.
- On doit apporter une correction sur le T_{LS} pour obtenir le temps solaire qui tient compte du fuseau horaire et de la différence de longitude entre le méridien standard et la longitude exacte du lieu.

Temps solaire

- Le temps solaire
  - $T_s = T_{ls} + E \pm 4(L_{st}\text{-}L_{loc}) - He$
    - Où T_s est le temps solaire;
    - T_{ls}, le temps local standard ou temps civil (sans prendre en compte l'heure d'été, min);
    - E, l'équation du temps (min);
    - L_{st}, la longitude standard du lieu (°);
    - L_{loc}, la longitude locale du lieu (°) *;
    - et He, l'heure d'été (0 ou 60 min.)

*** Le signe ± vient de ce que l'on a des méridiens à l'est et à l'ouest de Greenwich. En Amérique du Nord, on met un signe positif .**

Temps solaire

- L'heure d'hiver et l'heure d'été
  - En France, l'heure d'hiver éloigne d'une heure de l'heure solaire et celle d'été de deux heures.
  - À l'heure d'hiver toute l'année, le soleil se lèverait à 5h16 à Brest le 20 juin contre 4h31 à Strasbourg.
  - À l'heure d'été, il se lèverait à 10h06 le 20 décembre à Brest contre 9h22 à Strasbourg.
  - Pour le Québec, il faut changer d'heure 2 fois par année, consultez:

    http://www4.gouv.qc.ca/fr/Portail/citoyens/programme-service/Pages/Info.aspx?sqctype=sujet&sqcid=472

Temps solaire

ENR2020

- Quel est le temps solaire à Madison Wisconsin le 3 février à 10h30 (temps local standard).
- La longitude standard pour laquelle le temps local est déterminé est égale à 90º, tandis que la longitude locale de Madison est de 89,4º

Utilisez Duffie et Beckman

Temps solaire

- Pour déterminer E, je vous recommande de :
  - Déterminer n
  - Calculer B
  - Convertir B en radians (en fonction de l'outil de calcul utilisé)
  - Calculer les fonctions trigonométriques
  - Calculer le terme entre crochets
  - Multiplier par 2,2918

Programmez à l'avance votre Ti ou votre portable.
Cela évitera des erreurs de calcul lors de l'examen

Temps solaire

At Madison, Wisconsin, what is the solar time corresponding to 10:30 AM central time on February 3?

Solution

In Madison, where the longitude is 89.4° and the standard meridian is 90°, Equation 1.5.2 gives

$$\text{Solar time} = \text{standard time} + 4(90 - 89.4) + E$$
$$= \text{standard time} + 2.4 + E$$

On February 3, $n = 34$, and from Equation 1.5.3 or Figure 1.5.1, $E = -13.5$ min, so the correction to standard time is -11 min. Thus 10:30 AM Central Standard Time is 10:19 AM solar time. ■

In this book time is assumed to be solar time unless indication is given otherwise.

Duffie et Beckman, p.11-12

Temps solaire

- Calculez le temps solaire à Montréal le 14 novembre à 12h00 (temps local standard).
- La longitude standard pour laquelle le temps local est déterminé est égale à 75° de longitude ouest

Les coordonnées géographiques de Montréal, Canada
Latitude : 45°30’31” Nord
Longitude : 73°35’16” Ouest
L’altitude par rapport au niveau de la mer : 216 m
Les coordonnées de Montréal en degrés décimaux
Latitude : 45.5088400°
Longitude : 73.5878100°
https://dateandtime.info/fr/citycoordinates.php?id=6077243

Temps solaire à 12h00 le 14 novembre à Montréal		
Temps local	12:00:00	Heure
Temps local minutes	720,00	Minutes
Longitude standard	75	Degrés
Logitude locale	73,58781	Degrés
Correction	5,64876	minutes
ET	15,33	minutes
Temps solaire	740,98	minutes
	12,35	heures
	12:20:59	heures

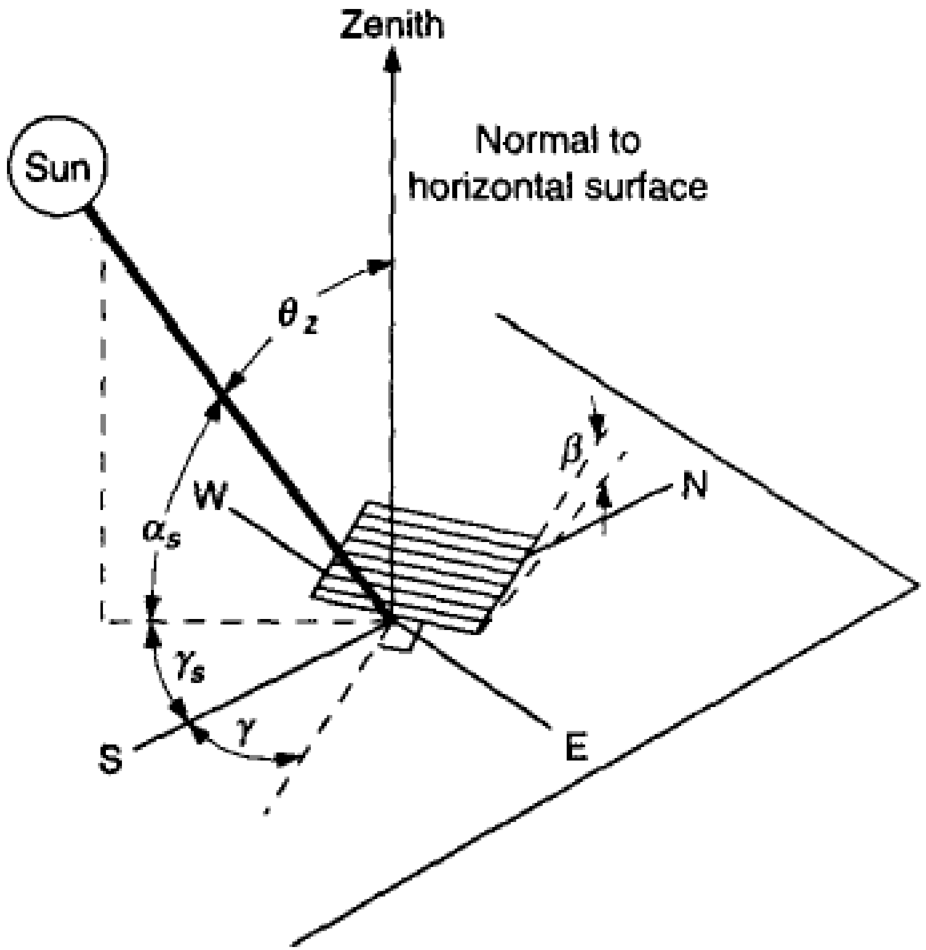
Temps solaire

- Calculez le temps solaire à Montréal maintenant.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Le temps solaire
- ***La géométrie solaire***
- Conclusion

La géométrie solaire

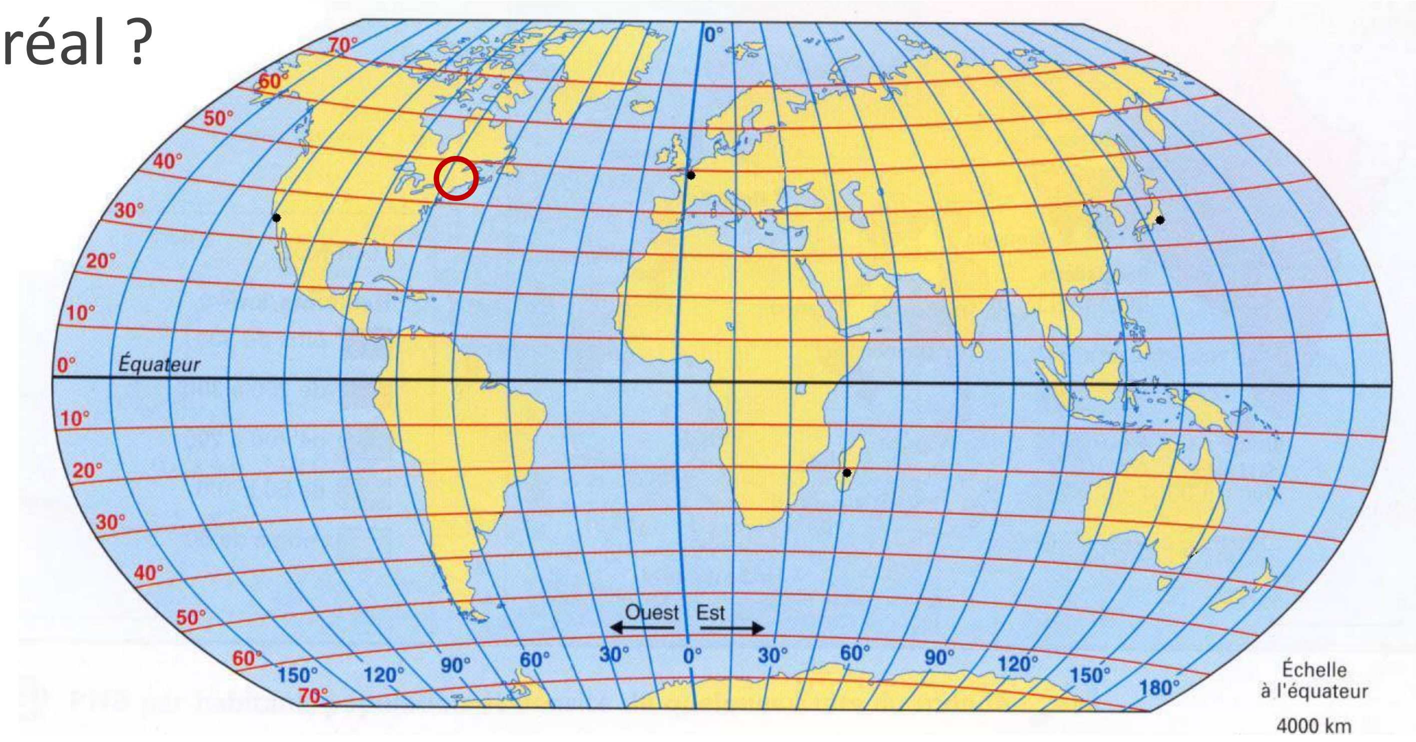


Réf: Duffie et Beckman, 2006

- φ : Latitude
- δ : Angle de déclinaison solaire
- ω : Angle horaire solaire
- α_S : Angle de l'altitude solaire
- θ_Z : Angle du zénith solaire
- γ_S : Angle de l'azimut solaire
- β : Pente de la surface
- γ : Azimut de la surface
- θ : Angle d'incidence

La géométrie solaire

- La latitude, φ (°)
  - C'est l'angle qui est défini par le plan qui passe par un point sur terre et le centre de celle-ci et le plan de l'équateur, $-90° \leq \varphi \leq 90°$
  - Quelle est celle de Montréal ?



Parallèles (en rouge) -> Latitude
Méridiens (en bleu) -> Longitude

La géométrie solaire

- L'angle de déclinaison solaire, δ (º)
  - la Terre tourne autour du Soleil sur une trajectoire elliptique contenue dans un plan écliptique; la normale à ce plan et l'axe de rotation de la Terre font un angle variable δ, qu'on nomme déclinaison solaire, $-23.45° \leq \delta \leq 23.45°$

Cette déclinaison varie-t-elle chaque heure? Chaque jour?
Dépend-elle du lieu sur la terre?

La géométrie solaire

- L'angle de déclinaison solaire, δ (°)

$$\delta = \frac{180}{\pi}\begin{bmatrix} 0{,}006918 - 0{,}399912\cos(B) + 0{,}070257\sin(B) \\ -0{,}006758\cos(2B) + 0{,}000907\sin(2B) \\ -0{,}002697\cos(3B) + 0{,}00148\sin(3B) \end{bmatrix}$$

formulation plus exacte (erreur < 0,0335°) de Spencer, 1971

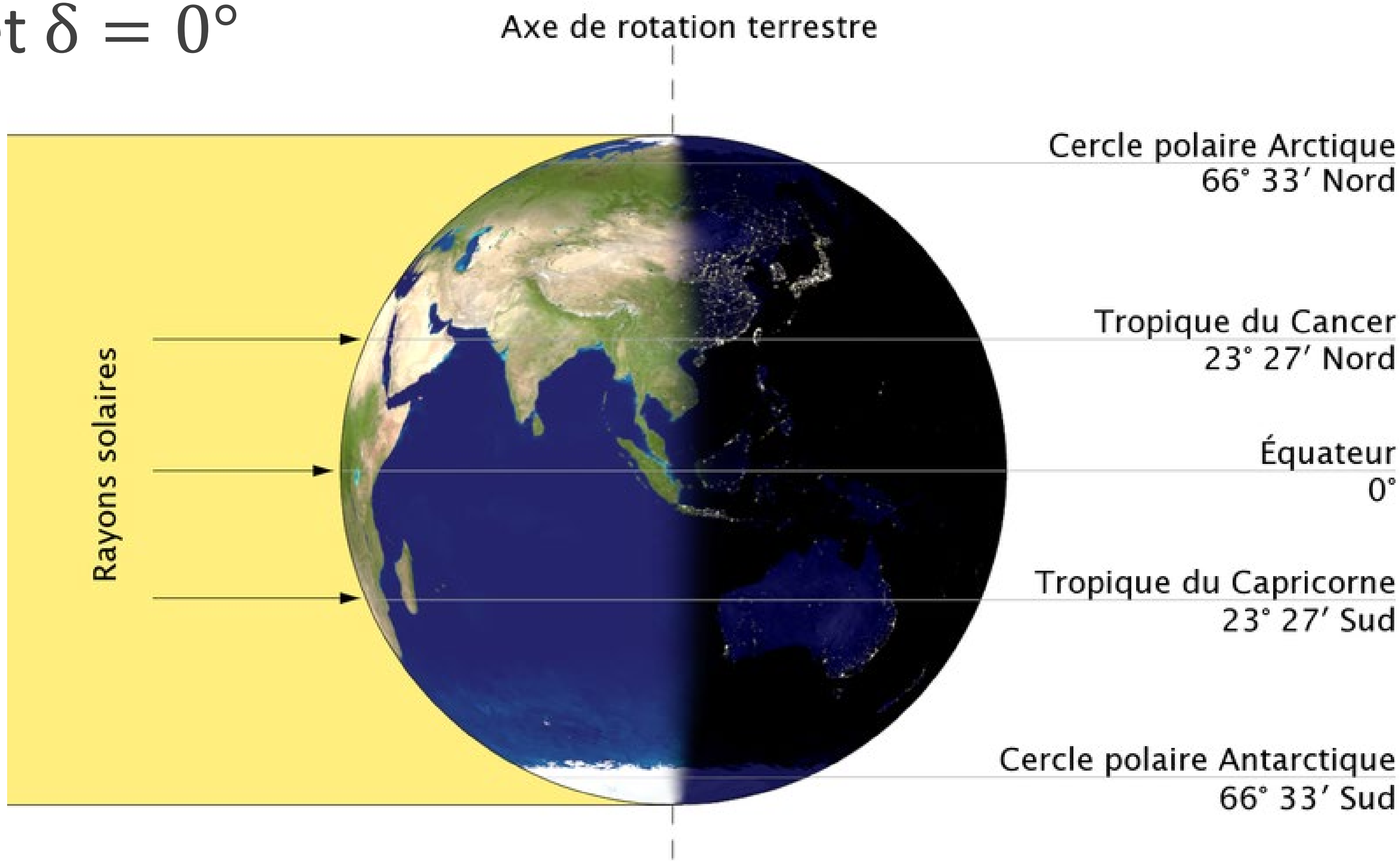
$$B = (n-1)\frac{360}{365}$$

$$\delta = 23{,}45\sin\left(\frac{360}{365}(284+n)\right)$$

formulation approximative de Cooper, 1969, à employer comme vérification de la correcte implantation de la précédente seulement.

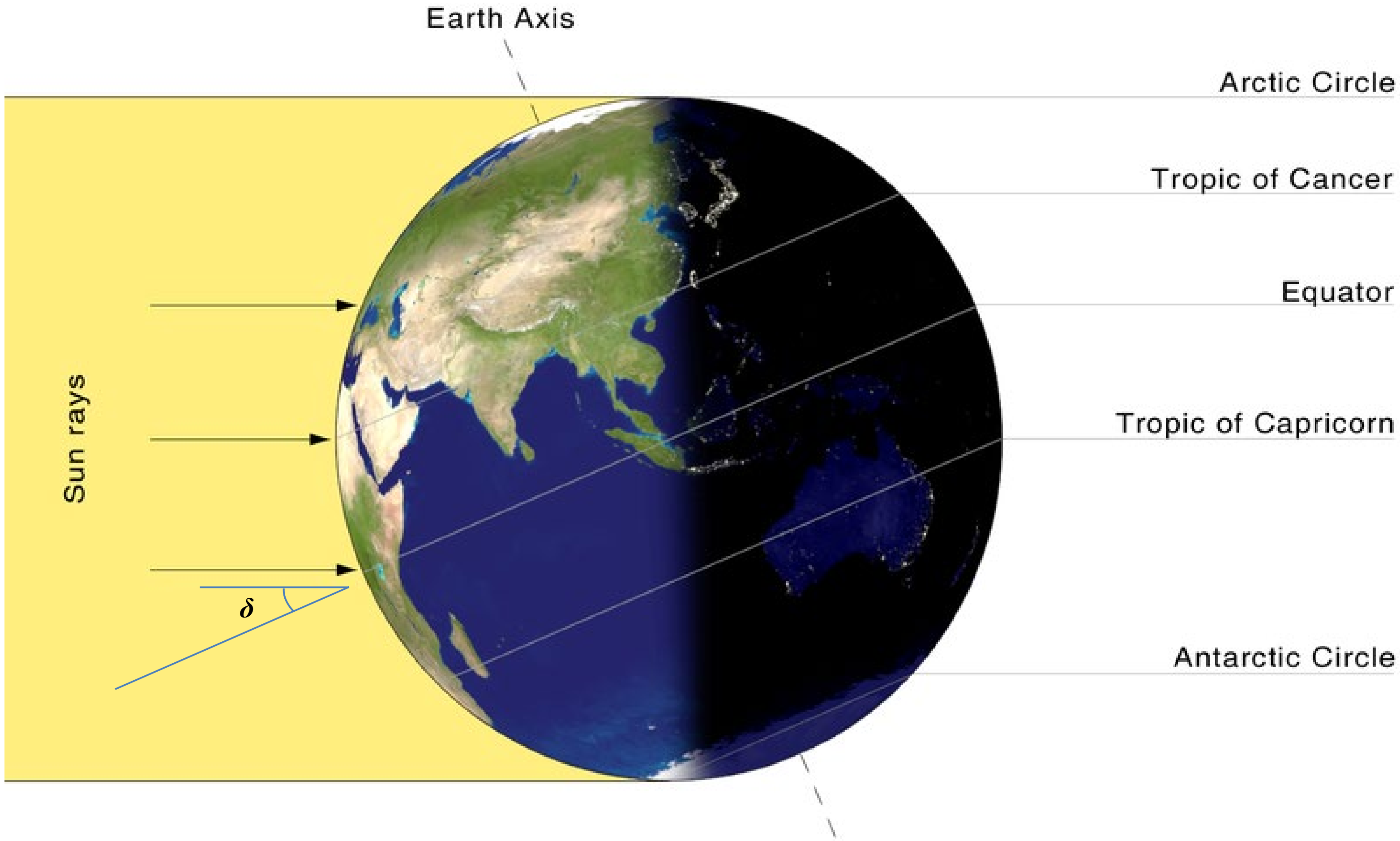
La géométrie solaire

- Équinoxes de printemps 21 mars et d'automne 23 septembre (jour = nuit) et $\delta = 0°$



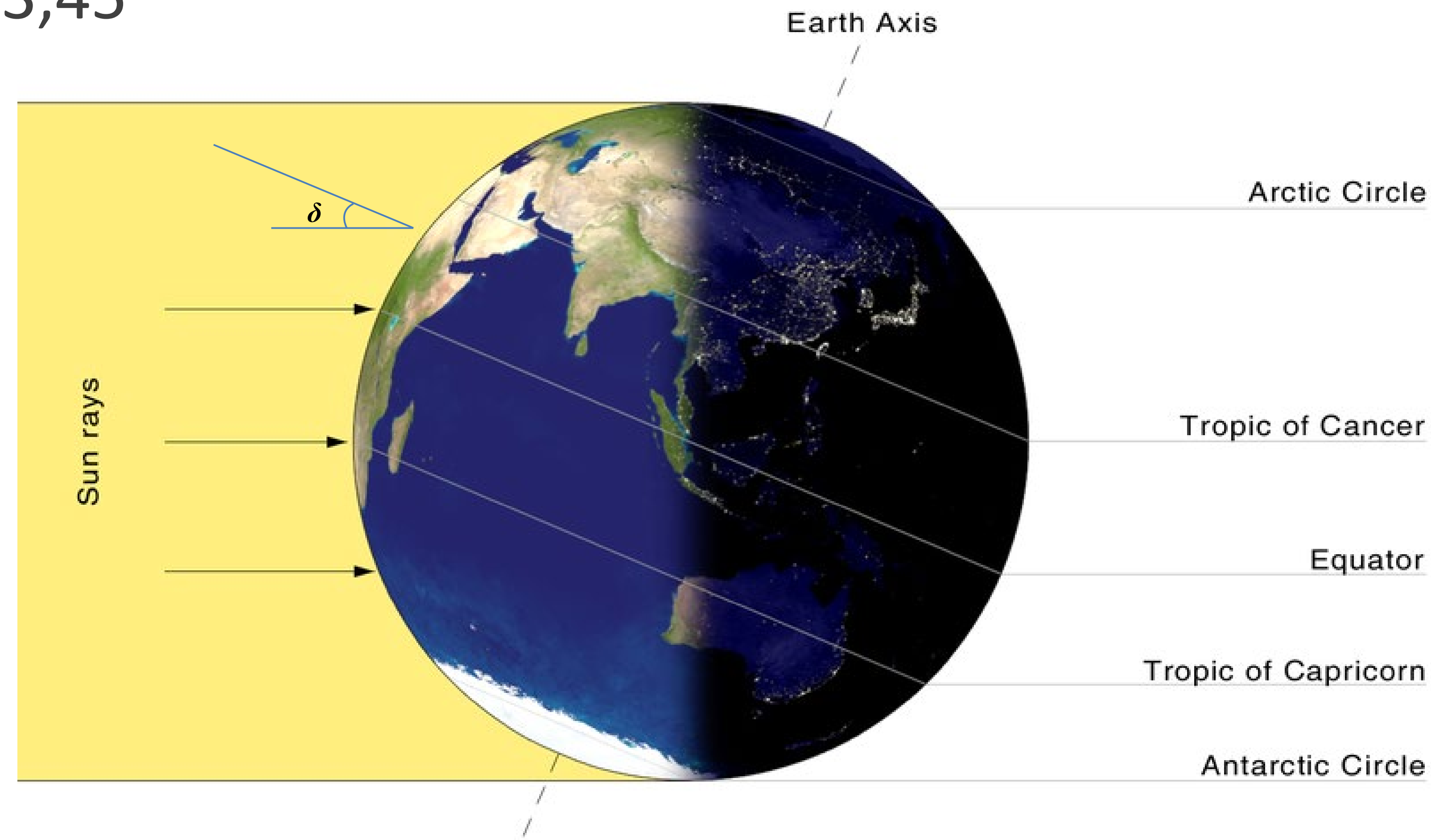
La géométrie solaire

- Solstice d'été (jour le plus long de l'année 20-22 juin) et δ =23,45°



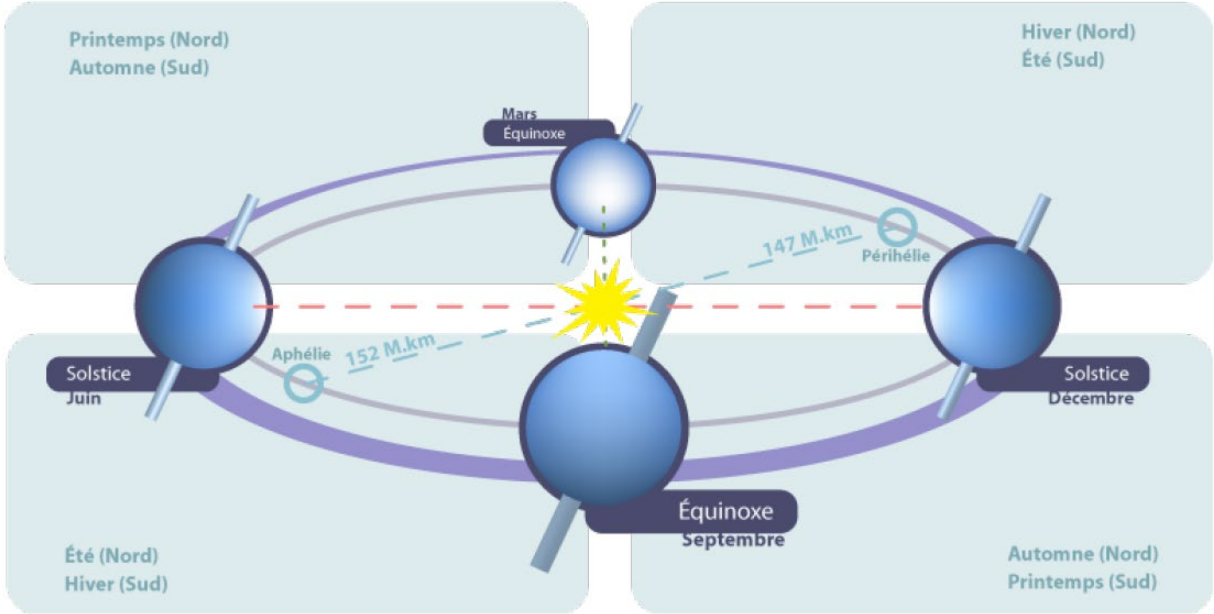
La géométrie solaire

- Solstice d'hiver (jour le plus court de l'année 20-22 décembre) et $\delta = -23{,}45°$



La géométrie solaire

- L’angle de déclinaison solaire, δ



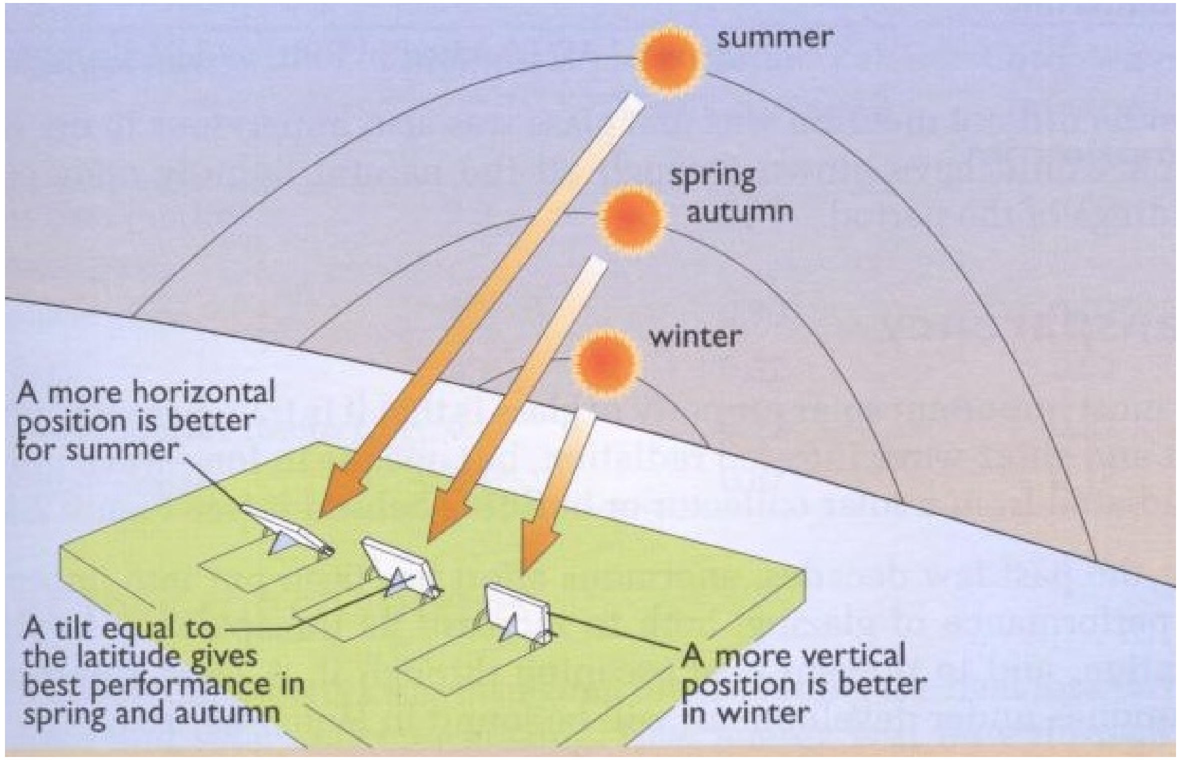
Réf : Michaël Kummert, 2011

California Academy of Sciences. 2015. *Why Do We Have Different Seasons?*

https://www.youtube.com/watch?v=WgHmqv_-UbQ

La géométrie solaire

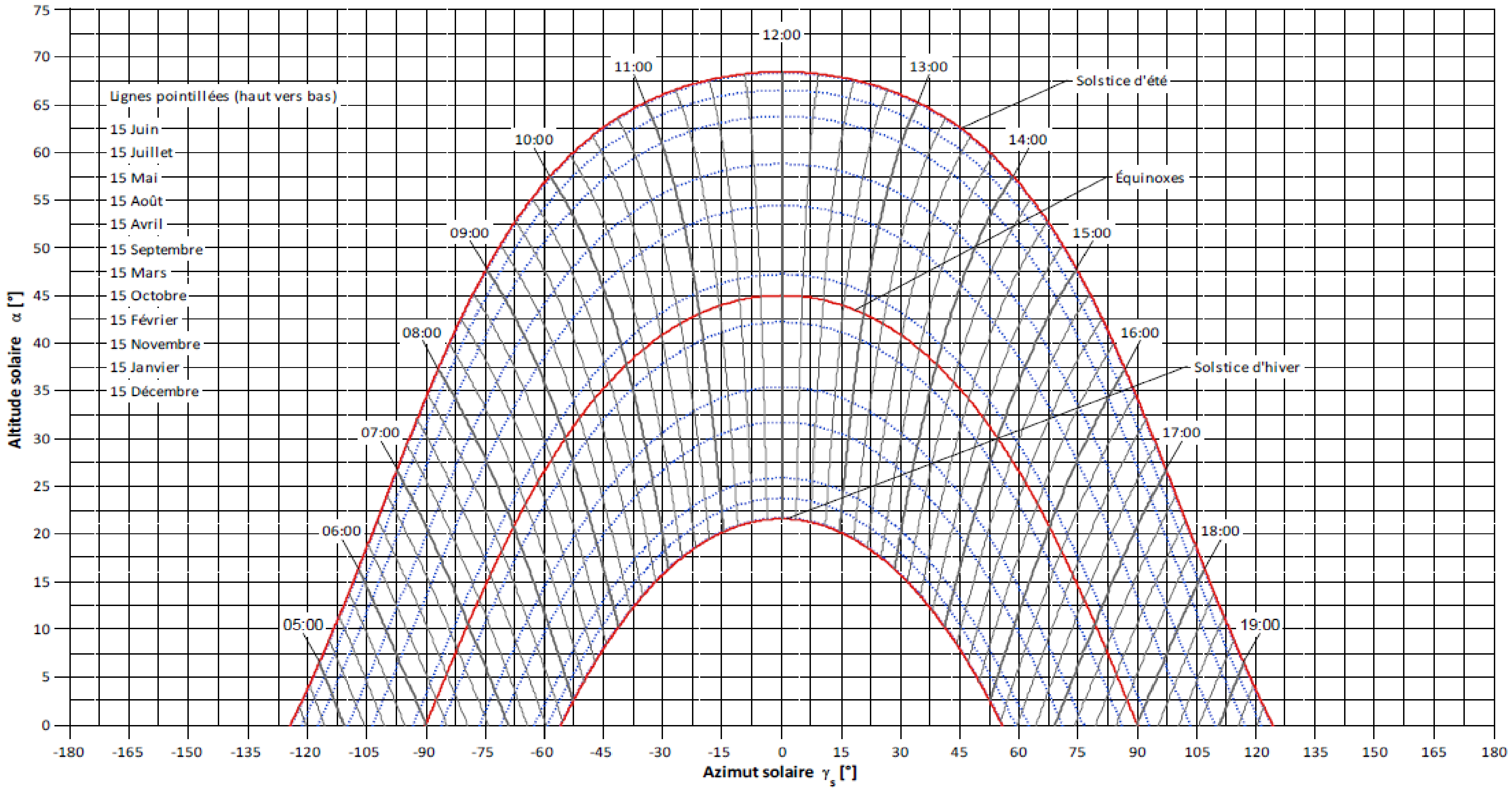
- L’angle de déclinaison solaire, δ



Solar Schoolhouse. 2011. *Intro to Solar OrientationSolar*
https://www.youtube.com/watch?v=OR8EQ0DWpPw

La géométrie solaire

- Exemple de trajectoire apparente pour $\varphi = 45°$



Réf : Michaël Kummert, 2011

La géométrie solaire

ENR2020

- Quelle est la déclinaison solaire, δ , le 14 novembre à Montréal?
  - Faites le calcul avec la formule simplifiée pour obtenir une bonne idée de la valeur exacte et ainsi pouvoir valider votre calcul exact;
  - Faites ce calcul avec la formule plus exacte de Spencer;
  - Comparez les deux valeurs en degrés.

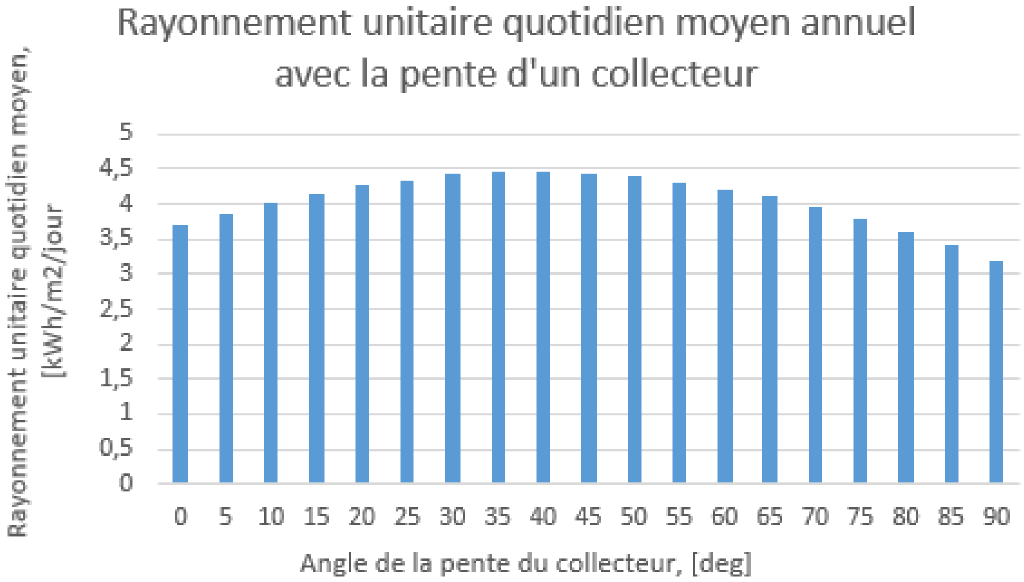
Question

- Quel est le meilleur angle d’inclinaison de collecteurs solaires PV employés dans le contexte
  - d’une maison autonome?
  - d’un feed-in tariff?
  - d’un mesurage net annuel?

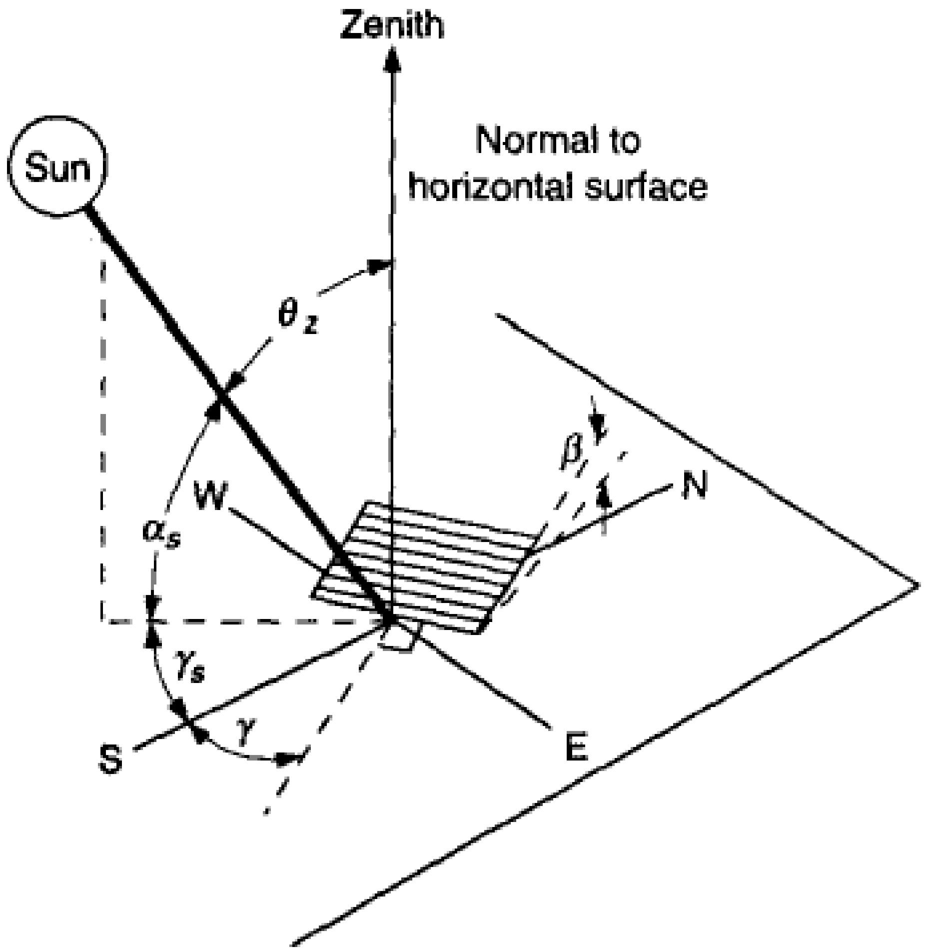
- [Intro to Solar Orientation]

La production maximale pour Mtl

- Quel est le meilleur angle d'inclinaison de collecteurs solaires PV employés dans le contexte.
  - Solution discutée dans les exercices
  - Exemple de Montréal pour une pente fixe et azimut sud (180°)



La géométrie solaire



Réf: Duffie et Beckman, 2006

- φ : Latitude
- δ : Angle de déclinaison solaire
- ω : Angle horaire solaire
- α_S : Angle de l'altitude solaire
- θ_Z : Angle du zénith solaire
- γ_S : Angle de l'azimut solaire
- β : Pente de la surface
- γ : Azimut de la surface
- θ : Angle d'incidence

La géométrie solaire

- L'angle horaire solaire, ω (°)
  - Angle qu'il faudrait imposer en rotation à la terre afin que le méridien soit exactement sous le soleil.
  - C'est le déplacement horaire du soleil de l'est à l'ouest dû à la rotation de la Terre.
  - ω est égal à 0° lorsque le Soleil passe au plan méridien du lieu (il est midi solaire vrai à ce moment).
  - Cet angle est compté positivement de midi solaire vrai jusqu'au coucher du Soleil et négativement, du lever du Soleil jusqu'au midi vrai, 15° par heure.

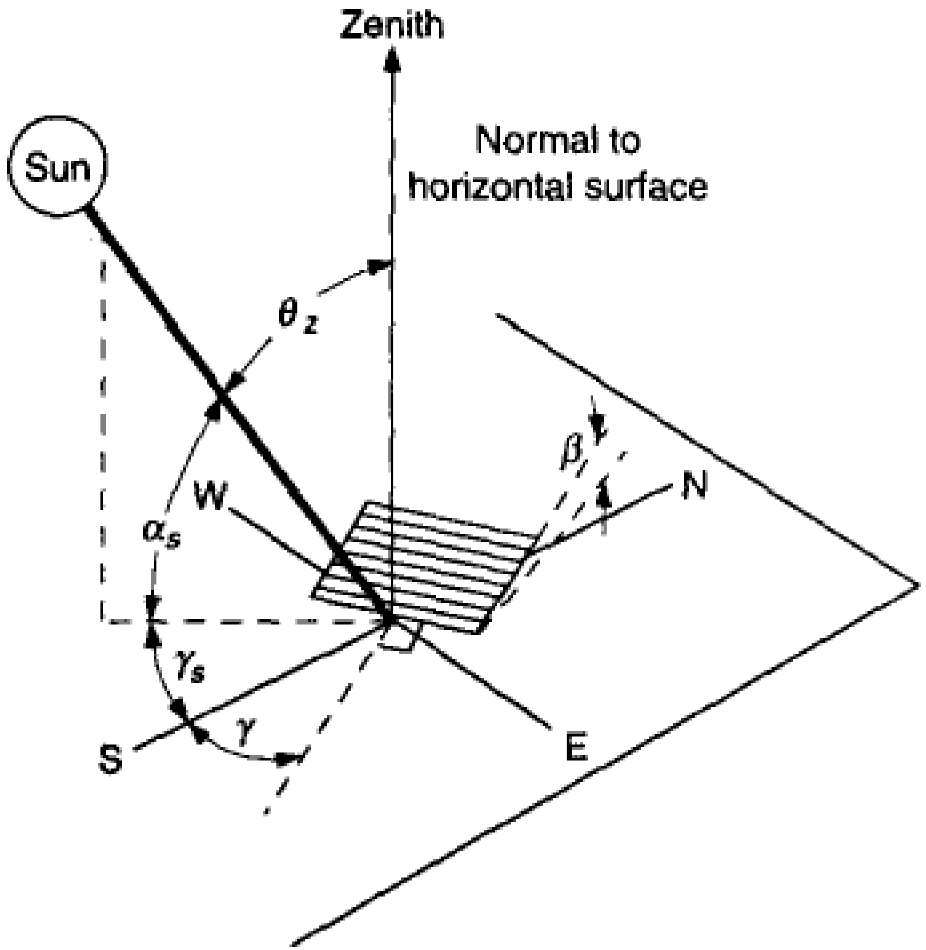
La géométrie solaire

- L'angle horaire solaire, ω (°)
  – Puisqu'il y a 360/24 ou **15º par heure** ou période de 60 minutes, cet angle est ainsi égal ± 0,25 (nombre de minutes du **midi solaire** local).

$$\omega = (T_S - 12) * 15$$

  – A midi solaire, cet angle est nul.
  – Il est de 45º à 15h00 solaire et de -45º à 9h00 solaire, etc.

La géométrie solaire



Réf: Duffie et Beckman, 2006

- φ : Latitude
- δ : Angle de déclinaison solaire
- ω : Angle horaire solaire
- α_S : Angle de l'altitude solaire
- θ_Z : Angle du zénith solaire
- γ_S : Angle de l'azimut solaire
- β : Pente de la surface
- γ : Azimut de la surface
- θ : Angle d'incidence

La géométrie solaire

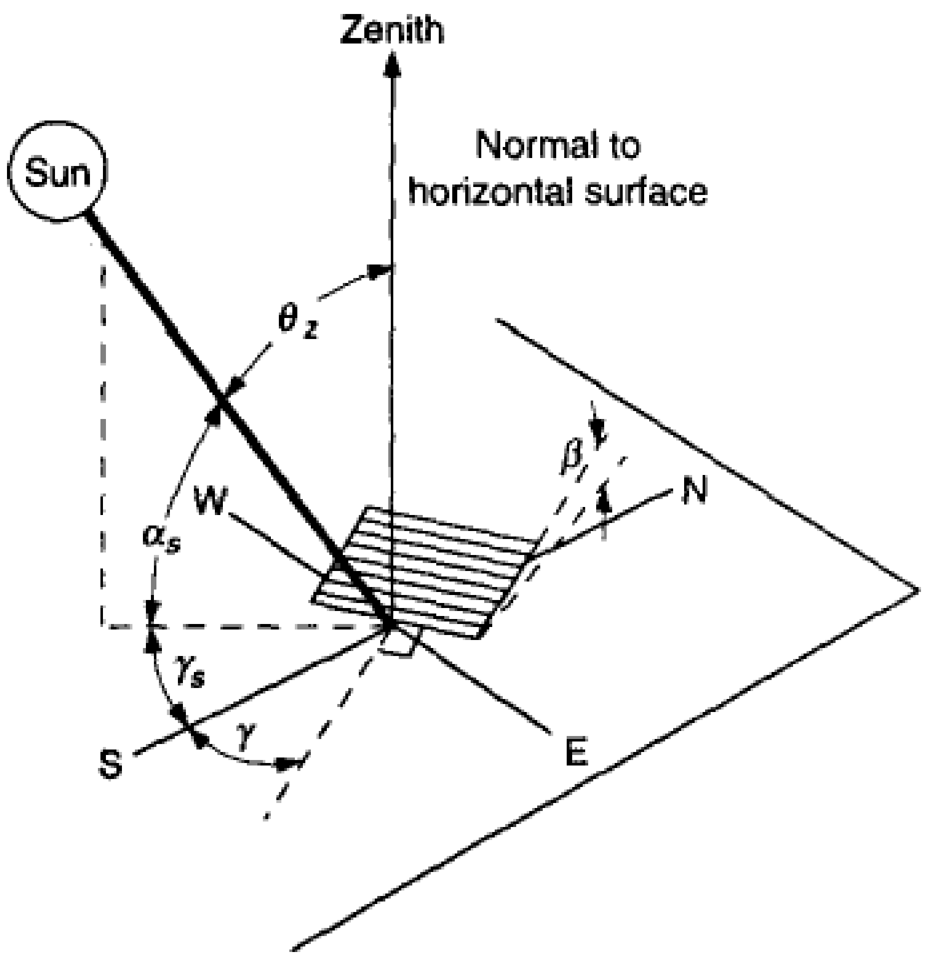
- L'angle de l'altitude solaire, α_S (°)
  - C'est un angle entre la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal.

$$\alpha_S = \sin^{-1}[\sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(\omega)]$$

  - À **midi solaire**, par définition, le soleil est exactement sur le méridien et à ce moment.

$$\alpha_{S,midi} = 90^o - \varphi + \delta$$

La géométrie solaire



Réf: Duffie et Beckman, 2006

- φ : Latitude
- δ : Angle de déclinaison solaire
- ω : Angle horaire solaire
- α_S : Angle de l'altitude solaire
- θ_Z : Angle du zénith solaire
- γ_S : Angle de l'azimut solaire
- β : Pente de la surface
- γ : Azimut de la surface
- θ : Angle d'incidence

La géométrie solaire

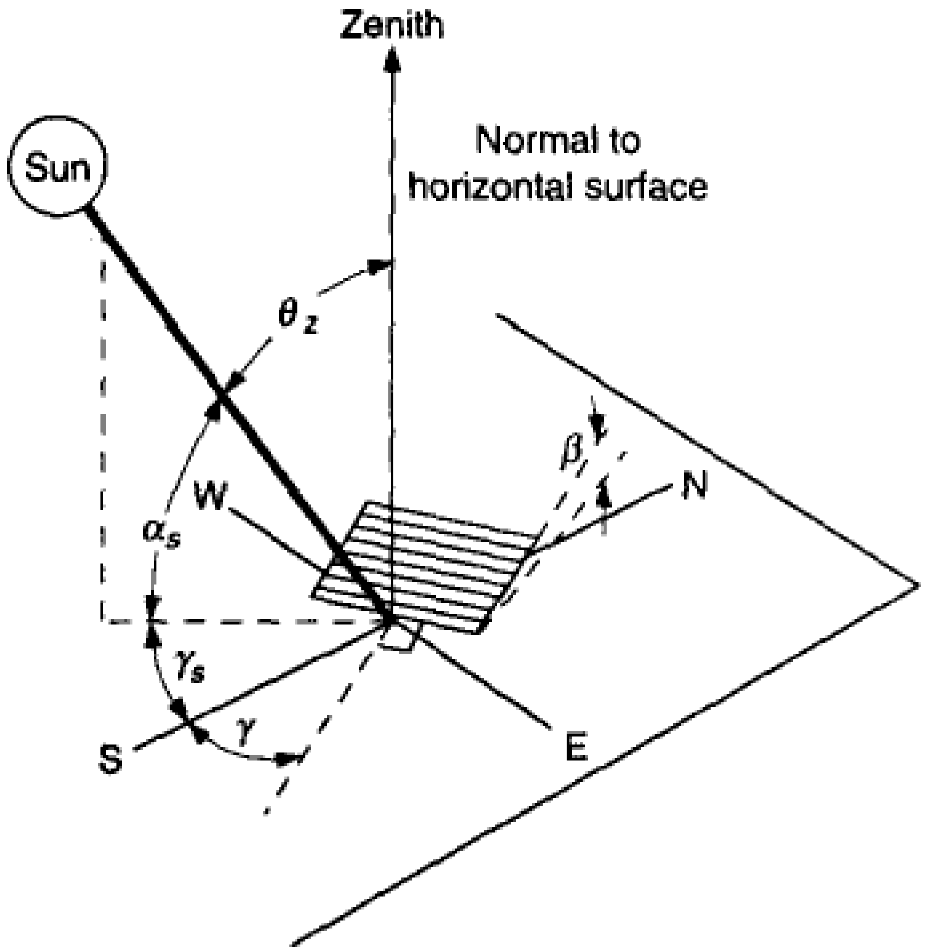
- L'angle du zénith solaire, θ_Z (°)
  - C'est un angle entre la direction du Soleil et la verticale (normale à la surface de la Terre).
  - C'est le complément de l'altitude solaire.
  - Il doit être compris entre 0 et 90°.

$$\theta_Z = 90^o - \alpha_S$$

  - Ou encore directement, sans calculer la hauteur solaire

$$\theta_Z = \cos^{-1}[\sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(\omega)]$$

La géométrie solaire



Réf: Duffie et Beckman, 2006

- φ : Latitude
- δ : Angle de déclinaison solaire
- ω : Angle horaire solaire
- α_S : Angle de l'altitude solaire
- θ_Z : Angle du zénith solaire
- γ_S : Angle de l'azimut solaire
- β : Pente de la surface
- γ : Azimut de la surface
- θ : Angle d'incidence

La géométrie solaire

- L'angle de l'azimut solaire, γ_S (°)
  - C'est l'angle entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction du sud, compté négativement à l'est et positivement à l'ouest.
  - Valide tant que le soleil ne se lève pas plus à l'est que l'est géographique et qu'il ne se couche pas plus à l'ouest que l'ouest i.e en été. En effet, l'angle azimutal pour ces cas est de -180 + valeur absolue (ω, calculé) le matin et (180 – ω) calculé en après midi.
  - L'azimut solaire est donc négatif AVANT midi solaire et positif après

La géométrie solaire

- L'angle de l'azimut* solaire, γ_S (°)
  - Duffie et Beckman :

$$\gamma_S = \operatorname{sign}(\omega) * \left| \cos^{-1}\left(\frac{\cos(\theta_Z)\sin(\varphi) - \sin(\delta)}{\sin(\theta_Z)\cos(\varphi)}\right) \right|$$

  - Le manuel de l'ASHRAE Handbook, chap 14 :

$$\gamma_S = \cos^{-1}\left(\frac{\cos(\omega)\cos(\delta)\sin(\varphi) - \sin(\delta)\cos(\varphi)}{\cos(\alpha_S)}\right)$$

* Azimut peut aussi s'écrire azimuth

La géométrie solaire

- L'angle de l'azimut solaire, γ_S (°)
  - Si les deux expressions sont équivalentes :

$$\frac{\cos(\theta_Z)\sin(\varphi)-\sin(\delta)}{\sin(\theta_Z)\cos(\varphi)} - \frac{\cos(\omega)\cos(\delta)\sin(\varphi)-\sin(\delta)\cos(\varphi)}{\cos(\alpha_S)} = 0$$

  - Si on introduit

$$\cos(\theta_Z) = \sin(\alpha_S) = \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\omega)\cos(\delta)$$

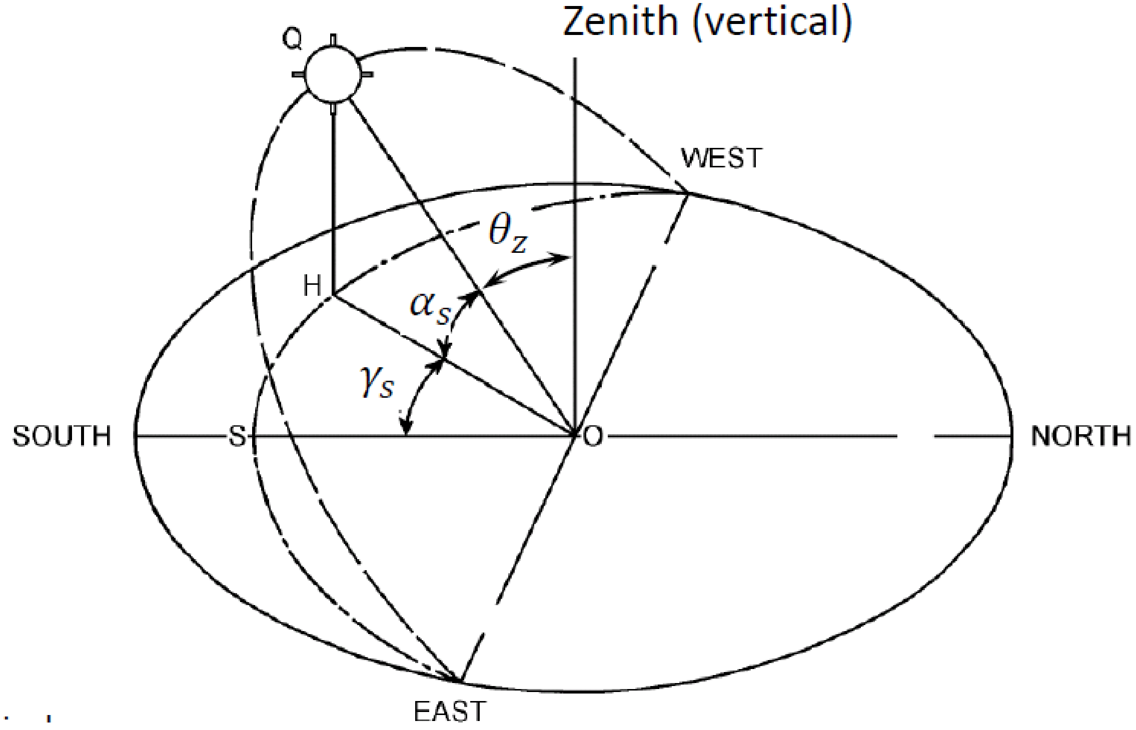
  - On peut alors démontrer que les deux expressions sont équivalentes
  - Une autre forme plus simple de calculer l'azimut solaire est:

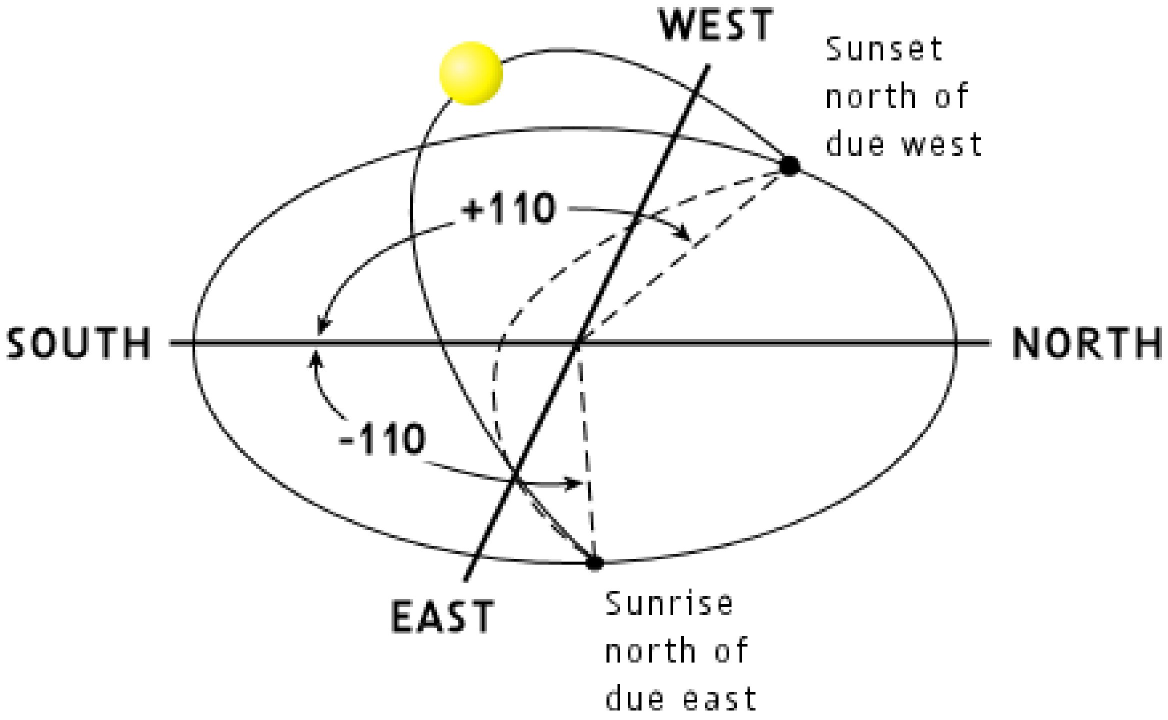
$$\gamma_S = \sin^{-1}\left(\frac{\sin(\omega)\cos(\delta)}{\cos(\alpha_S)}\right)$$

  - Elle permet de vérifier le calcul

La géométrie solaire

- Les angles solaires de base

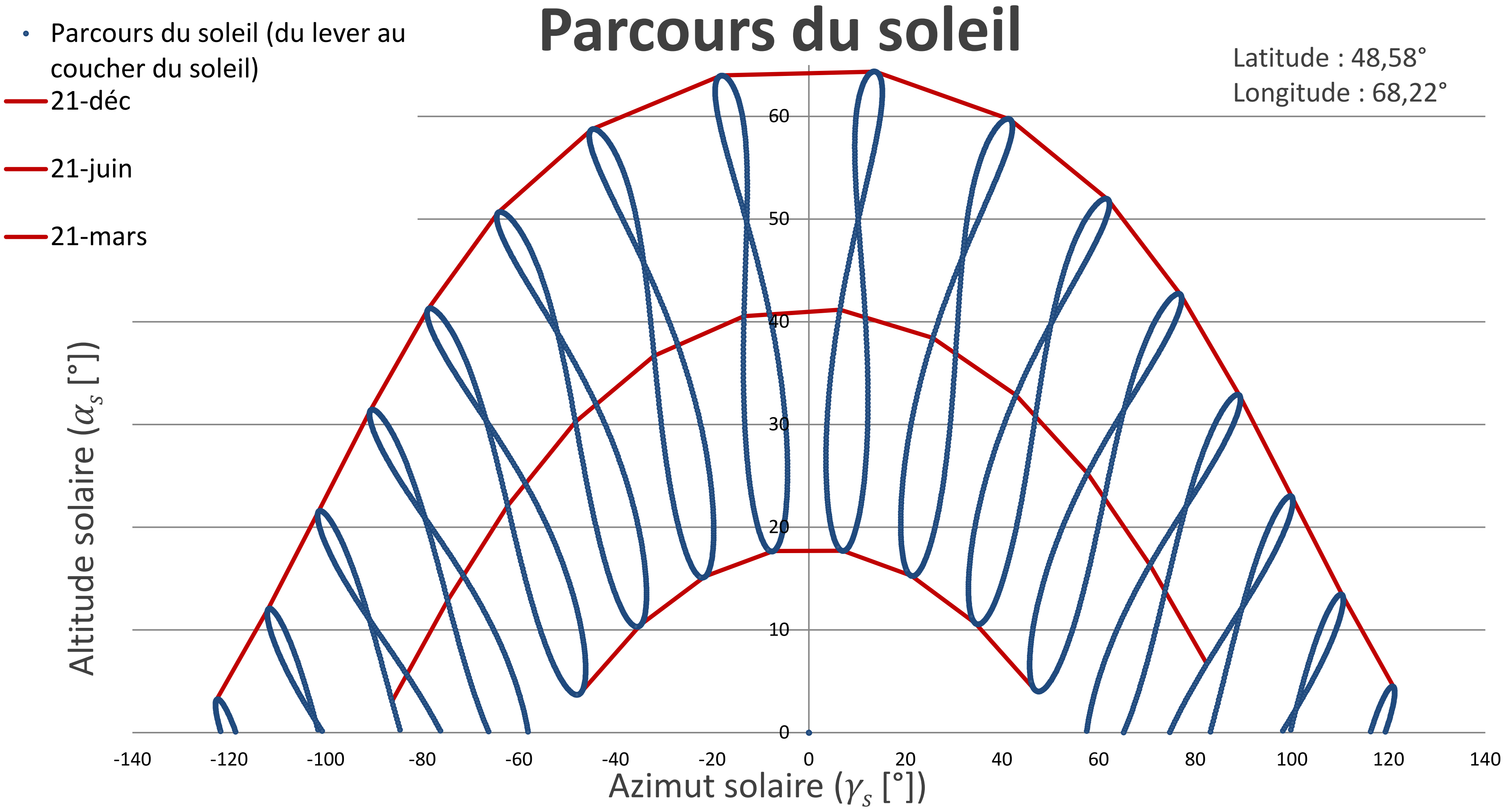




Exemple d'azimut en été

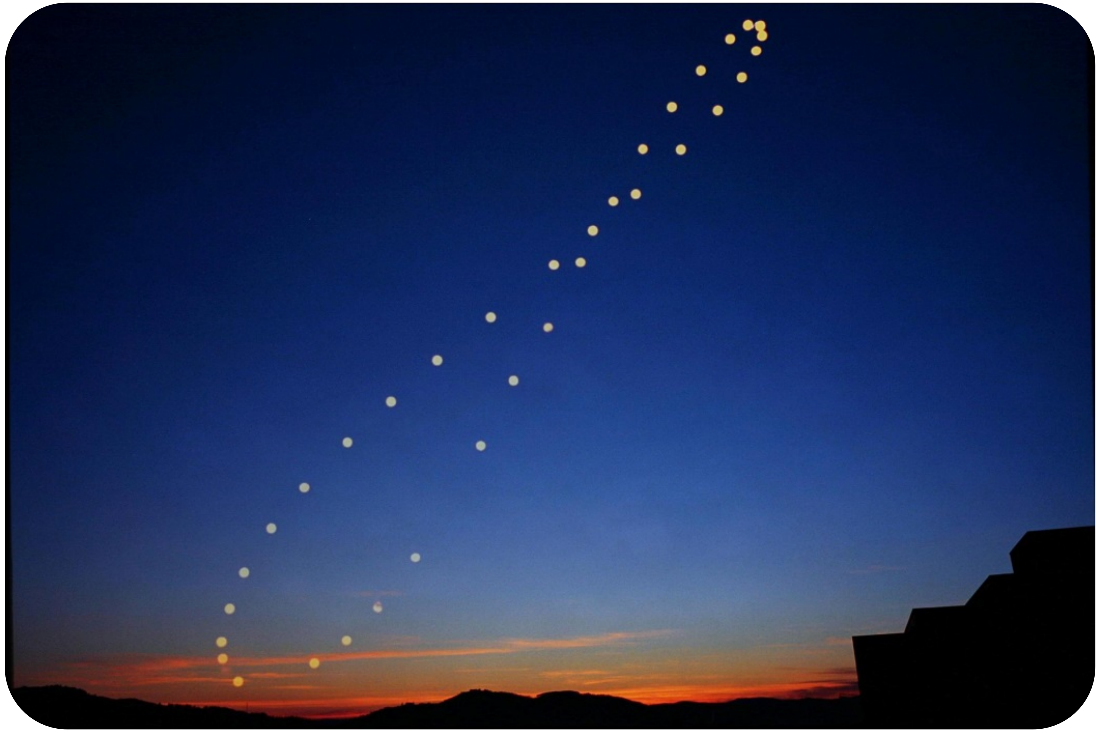
Note: L'azimut solaire est toujours négatif AVANT midi solaire et positif après

La géométrie solaire



La géométrie solaire

- Analème
  - Position du soleil dans le ciel à la même heure du jour. Ici 52 points pour 52 semaines.
  - La coordonnée verticale correspond à la déclinaison du soleil alors que la position horizontale indique le décalage entre l'heure solaire apparente et l'heure solaire moyenne : soit l'équation du temps.
  - L'orientation dépend de l'heure : à gauche le matin et à droite le soir.
  - A midi solaire, l'analème est vertical, mais pas symétrique. L'aphélie et le périphélie ne correspondent pas avec les solstices.



Réf : Pierre-Luc Paradis, 2015

La géométrie solaire

- Calculez le zénith, l'altitude solaire et l'azimut solaire pour un endroit situé à 43° de latitude :
  - A 18h30 heure solaire le 1er juillet
  - A 9H30 heure solaire le 13 février

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

$$\gamma_S = \operatorname{sign}(\omega) * \left|\cos^{-1}\left(\frac{\cos(\theta_Z)\sin(\varphi) - \sin(\delta)}{\sin(\theta_Z)\cos(\varphi)}\right)\right|$$

La géométrie solaire

- Calculez le zénith, l'altitude solaire et l'azimut solaire pour un endroit situé à 43º de latitude :
  - A 18h30 le 1er juillet

Azimuth solaire		
Sign (omega)	1	
Cos(Theta_z)	0,180661787	Calculé précédemment
Sin (Phi)	0,681998351	Calculé précédemment
Sin (Delta)	0,39357594	Calculé précédemment
Sin (Theta_z)	0,98354528	
Cos (Phi)	0,73135371	Calculé précédemment
Cos(Gamma_s)	-0,375862051	Check
Gamma_s	1,956123188	RAD
Gamma_s	112,0776048	Degrés

Altitude solaire		
alphas	10,40830805	Degrés

Zenith		
n	182	
Heure solaire	18,5	Heure
Phi	43	Degrées
Phi	0,750491566	RAD
Sin (Phi)	0,681998351	
Cos (Phi)	0,73135371	
Delta	23,17718903	Degrés
Delta	0,404518253	RAD
Sin (Delta)	0,39357594	
Cos (Delta)	0,919292108	
Omega	97,5	Degrés
Omega	1,701695992	RAD
Sin (Omega)	0,991444865	
Cos (Omega)	-0,130526163	
Cos (Theta_z)	0,180661787	Check
Cos (Theta_z)	0,180661787	
Theta_z	1,389137058	RAD
Theta_z	79,59169195	Degrés

θ_z=79,6º; α_s=10,4º; γ_s=112,1º

La géométrie solaire

- Calculez le zénith, l'altitude solaire et l'azimut solaire pour un endroit situé à 43º de latitude :
  - A 9H30 le 13 février

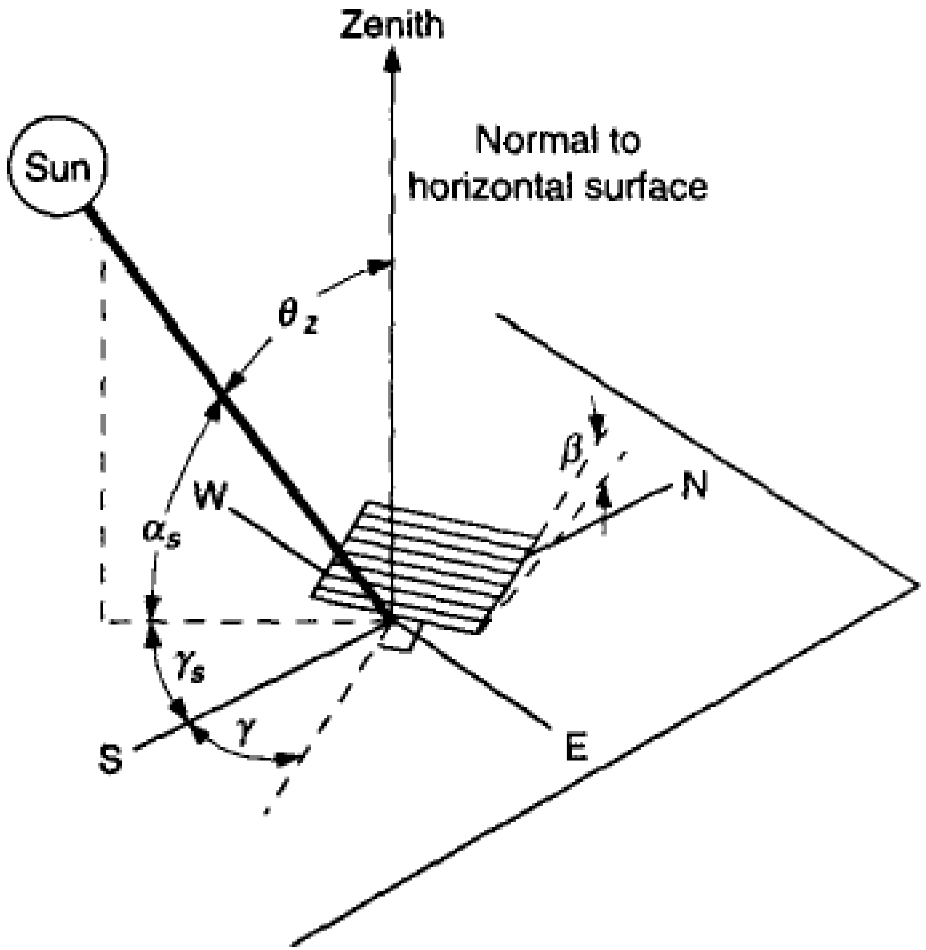
Zenith		
n	44	
Heure solaire	9,5	Heure
Phi	43	Degrées
Phi	0,750491566	RAD
Delta	-13,62835274	Degrés
Delta	-0,237859623	RAD
Omega	-37,5	Degrés
Omega	-0,654498458	RAD
Cos (Theta_z)	0,403190955	
Theta_z	1,155795207	RAD
Theta_z	66,22218848	Degrés

Altitude solaire		
alphas	23,77781152	Degrés

Azimuth solaire		
Sign (omega)	-1	
Cos(Theta_z)	0,403190955	Calculé précédemment
Sin (Phi)	0,681998351	Calculé précédemment
Sin (Delta)	-0,235623054	Calculé précédemment
Sin (Theta_z)	0,915115869	
Cos (Phi)	0,73135371	Calculé précédemment
Cos(Gamma_s)	0,762914873	Check
Gamma_s	-0,702986423	RAD
Gamma_s	-40,27815581	Degrés

θ_z=66,2º; α_s=23,8º; γ_s=-40,3º

La géométrie solaire



Réf: Duffie et Beckman, 2006

- φ : Latitude
- δ : Angle de déclinaison solaire
- ω : Angle horaire solaire
- α_S : Angle de l'altitude solaire
- θ_Z : Angle du zénith solaire
- γ_S : Angle de l'azimut solaire
- β : Pente de la surface
- γ : Azimut de la surface
- θ : Angle d'incidence

La géométrie solaire

Question: Pourquoi en sommes-nous à 50 pages de contenu pour déterminer tous ces angles?

- La pente d'une surface, β (°)
  - C'est un angle entre le plan de cette surface et l'horizontale.
  - Pour des murs de bâtiments, cet angle est un angle droit de 90°.

- L'azimut d'une surface, γ (°)
  - C'est l'angle entre la projection horizontale de la normale à une surface et le méridien
  - Négatif à l'est et positif à l'ouest
  - En général, on recherche une orientation plein sud au nord et plein nord au sud, soit $\gamma = 0$.

La géométrie solaire

- L'angle d'incidence sur une surface, θ (°)
  - C'est l'**angle recherché pour déterminer la quantité maximale de soleil qui sera interceptée par une surface**

$$\cos\theta = \sin\delta\sin\varphi\cos\beta - \sin\delta\cos\varphi\sin\beta\cos\gamma$$
$$+\cos\delta\cos\varphi\cos\beta\cos\omega + \cos\delta\sin\varphi\sin\beta\cos\gamma\cos\omega$$
$$+\cos\delta\sin\beta\sin\gamma\sin\omega$$

  - Note: Pour employer cette équation, il faut que ω soit entre le lever et le coucher du soleil, ω_s. Il ne faut pas que la terre elle-même bloque les rayons directs du soleil.

La géométrie solaire

- L'angle d'incidence sur une surface, θ (°)
  - C'est l'angle recherché pour déterminer la quantité maximale de soleil qui sera interceptée par une surface

$$\theta = \cos^{-1}[\cos(\theta_Z)\cos(\beta) + \sin(\theta_Z)\sin(\beta)\cos(\gamma_S - \gamma)]$$

  - Cette relation est équivalente à la précédente. Plus simple, elle requiert de connaître des angles différents
  - Note: L'angle d'incidence peut être supérieur à 90º. Dans ce cas, le soleil frappe la surface par-derrière.

La géométrie solaire

- Une surface est orientée à 45° par rapport à l'horizontale et pointe à 15° à l'ouest du sud.
- Quel est l'angle d'incidence du rayonnement direct sur cette surface située à Madison à 10h30 (temps solaire) le 13 février?

Angle incidence		
Beta	45	Degrés
Beta	0,78539815	RAD
Sin (Beta)	0,707106772	
Cos (Beta)	0,707106791	
Gamma	15	Degrés
Gamma	0,261799383	RAD
Sin (Gamma)	0,258819041	
Cos (Gamma)	0,965925827	
Cos (Theta), termes 1+2	0,004071143	
Cos (Theta), termes 3+4	0,882566445	
Cos (Theta), terme 5	-0,068064031	
Cos (Theta)	0,818573557	
Theta	0,611873074	RAD
Theta	35,05774534	Degrés

Angle incidence, avec Theta_z		
Cos (Theta)	0,818573557	Check

La géométrie solaire

- On peut écrire des relations simplifiées pour les cas suivants :
  - D'une surface orientée plein sud, $\gamma = 0$
  - D'un panneau vertical, $\beta = 90°$ -> $\theta = \cos^{-1}[\sin(\theta_Z)\cos(\gamma_S - \gamma)]$
  - D'un panneau horizontal, $\beta = 0°$ -> $\theta = \theta_Z$
- Cependant, une fois l'expression générale implantée et validée dans votre calculatrice/portable/code de calcul, il devient inutile de programmer les expressions simplifiées.
- Soyez prudent avec les surfaces horizontales. Que vaut alors γ? Quelle est son orientation?

Géométrie solaire

- Relations simplifiées
  - Avec une surface orientée plein sud, $\gamma = 0^o$, les 5 termes deviennent nuls

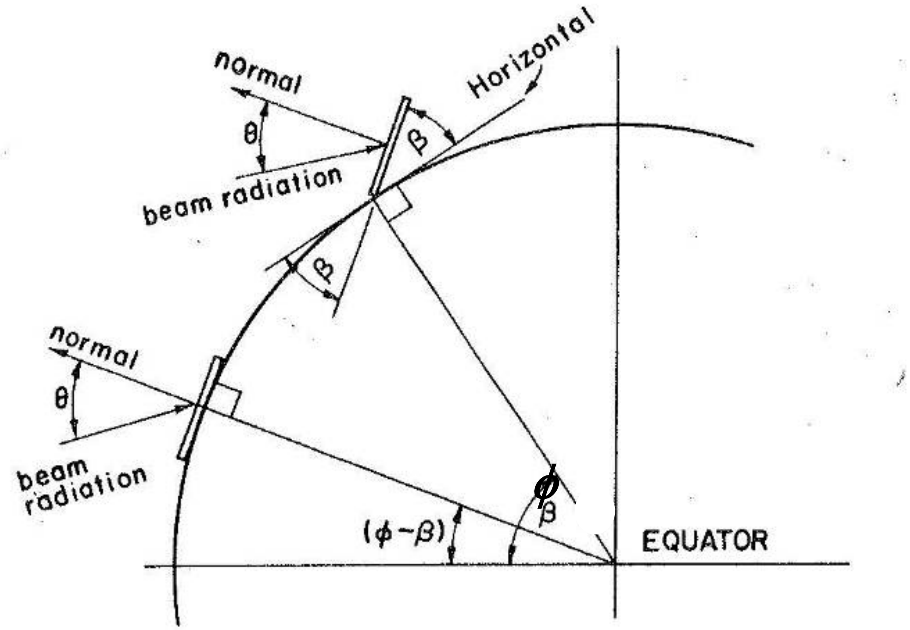
$$\cos\theta = \sin\delta\sin\varphi\cos\beta - \sin\delta\cos\varphi\sin\beta$$
$$+\cos\delta\cos\varphi\cos\beta\cos\omega + \cos\delta\sin\varphi\sin\beta\cos\omega$$

  - Avec un panneau vertical, $\beta = 90^o$

$$\cos\theta = -\sin\delta\cos\varphi\cos\gamma + \cos\delta\sin\varphi\cos\gamma\cos\omega$$
$$+\cos\delta\sin\gamma\sin\omega$$

Géométrie solaire

- Autre élément géométrique pour le cas particulier d'une surface orientée plein sud, $\gamma = 0^o$



$$\cos\boldsymbol{\theta} = \cos(\boldsymbol{\varphi} - \boldsymbol{\beta})\cos\boldsymbol{\delta}\cos\boldsymbol{\omega} + \sin(\boldsymbol{\varphi} - \boldsymbol{\beta})\sin\boldsymbol{\delta}$$

Géométrie solaire

- Relations simplifiées
  - Avec un panneau horizontal $\theta = \theta_z$

$$\cos\theta = \cos\theta_z = \cos\delta\cos\phi\cos\omega + \sin\phi\sin\delta$$

  - Au coucher du soleil, $\omega = \omega_s$ et $\theta = \theta_z = 90^o$

$$\cos\omega_s = -\frac{\sin\phi\sin\delta}{\cos\phi\cos\delta} = -\tan\phi\tan\delta$$

La géométrie solaire

- Temps solaire du lever et du coucher du soleil dans la journée

$$\omega_s = \cos^{-1}\left(-\tan(\varphi)\tan(\delta)\right)$$

$$T_{S\,lever} = \frac{-\omega_s}{15} + 12$$

$$T_{S\,coucher} = \frac{\omega_s}{15} + 12$$

La géométrie solaire

- Calculez le temps local du lever et du coucher du soleil à Madison le 16 mars. Heure solaire.

Coucher/lever de soleil			À midi solaire
Phi	43	Degrées	minutes
tanPhi	0,932515062		minutes
Delta	-2,4		minutes
tanDelat	-0,035654314		
Cosws	0,033248185		minutes
ws	1,537542013	Radians	heures
ws	88,09466966	Degrés	
ws	5,872977978	Heures	minutes
ws	352,3786787	Minutes	heures
ws	5:52:23	Diférence en heures	
Lever du soleil	6:07:37	Temps solaire	
Coucher su soleil	17:52:23	Temps solaire	

La géométrie solaire

- Calculez le temps local du lever et du coucher du soleil à Montréal le 14 novembre. Heure civile.

La géométrie solaire

- Calculez le temps local du lever et du coucher du soleil à Montréal le 14 novembre.

Équation du temps en fonction du jour de l'année			
n	318	Jour de l'Année	
B	312,6575342		Duffie
B rad	5,456903311		
sin(2B)	-0,996658887		
cos (2B)	-0,081676581		
cos(B)	0,677614721		
sin(B)	-0,735417086		
sin(3B)	-0,61528438		
cos (3B)	-0,788305228		
	0,066877925		
ET	15,3284204	minutes	Duffie

Temps solaire à 12h00 le 14 novembre à Montréal			
Temps local	12:00:00	Heure	
Temps local minutes	720,00	Minutes	
Longitude standard	75	Degrés	
Logitude locale	73,58781	Degrés	dateandtime.info
Correction	5,64876	minutes	4*(Ls-Ll)
ET	15,33	minutes	
Temps solaire	740,98	minutes	
	12,35	heures	
	12:20:59	heures	

Déclinaison			
n	318		
delta	-18,91195229	Degrés	Approximation
Delta =	-0,314873017	RAD	Spencer
Delta =	-18,04089528	Degrés	Spencer

La géométrie solaire

- Calculez le temps local du lever et du coucher du soleil à Montréal le 14 novembre.

Coucher/lever de soleil			À midi solaire
Phi	45,50884	Degrées	minutes
tanPhi	1,01792147		minutes
Delta	-0,314873017		minutes
tanDelat	-0,325708984		
Cosws	0,331546168		minutes
ws	1,232854359	Radians	heures
ws	70,63735272	Degrés	
ws	4,709156848	Heures	minutes
ws	282,5494109	Minutes	heures
ws	4:42:33	Diférence en heures	
Lever du soleil	7:17:27	Temps solaire	
Coucher su soleil	16:42:33	Temps solaire	

Temps solaire median		12:00:00	
Temps solaire median		720,00	minutes
Écart Tls - Ts		20,98	minutes
Temps civil à midi solaire		699,02	minutes
Temps civil à midi solaire		11:39:01	
Lever du soleil		6:56:28	
Coucher du soleil		16:21:34	

À gauche, le temps solaire

À droite, le temps civil

La géométrie solaire

- Quels sont l'angle horaire solaire ω , l'altitude solaire ou hauteur solaire α_s et l'angle azimutal solaire γ_s trois heures après midi solaire le 14 novembre à Montréal?.

Géométrie solaire

- Angle horaire solaire ω ,
  - + 3 heures ou +180 minutes*360/24[degré/heure]*1/60 [heure/minute]
  - Omega = 45°

La géométrie solaire

- Altitude solaire ou hauteur solaire α_s
  - Le zénith θ_z est égal à l'angle θ lorsque β=0 c.-à-d. l'angle d'incidence est le zénith sur une surface horizontale. Alors, l'équation suivante est valide

$$\cos\theta = \cos\theta_z = \cos\delta\cos\phi\cos\omega + \sin\phi\sin\delta$$

  - sin(α_s) = sin(Phi=45,5)*sin(δ=-18,04)+cos(ϕ)*cos(δ)*cos(ω=45)
  - sin(α_s) = 0,2503
  - sin(α_s) = cos(θ_z)
  - α_s est donc 14,5° à 3 heures après midi solaire.

Géométrie solaire

- Angle azimutal solaire γ_s

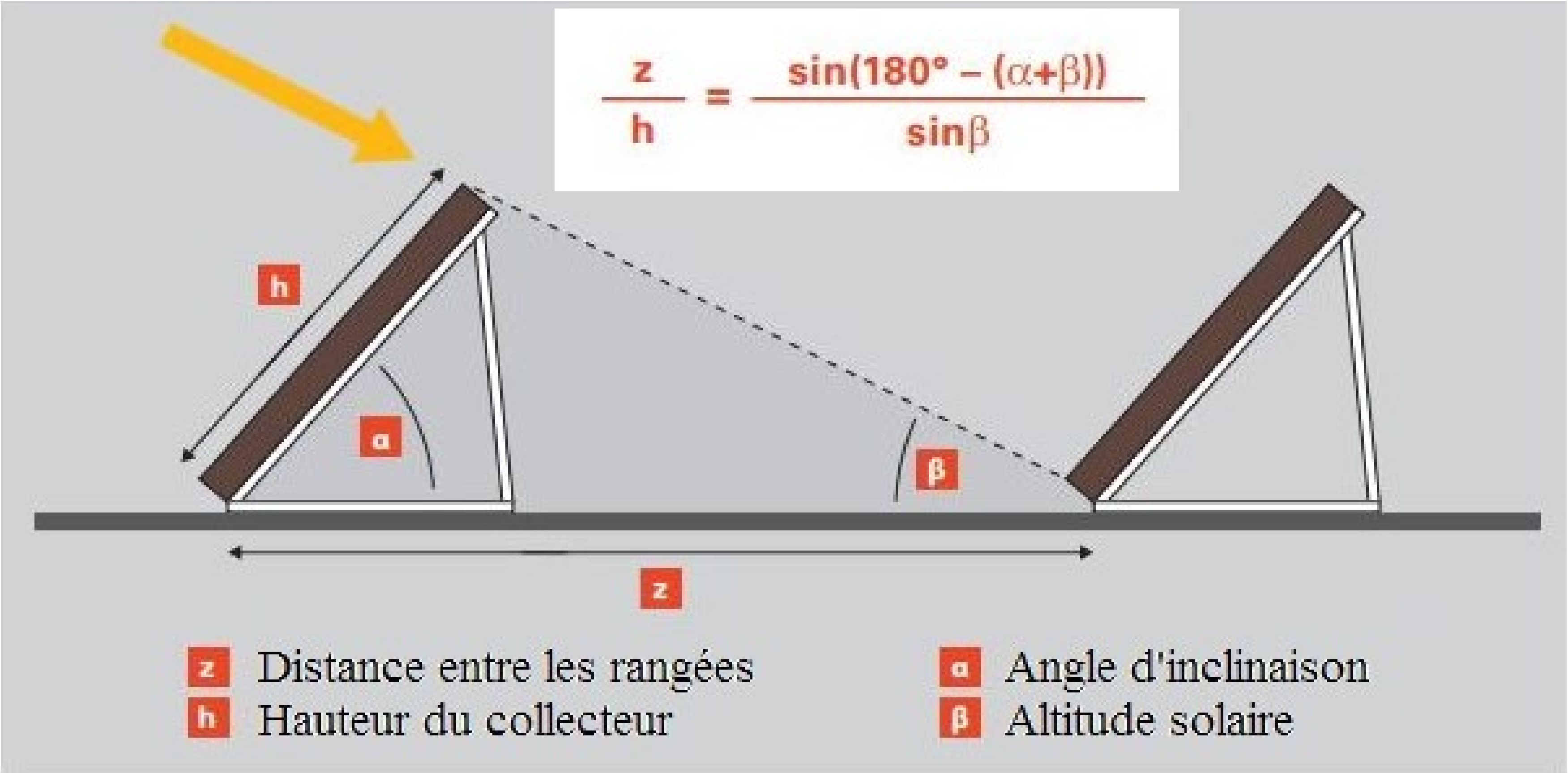
$$\sin(\gamma_s) = \frac{\cos(\delta)\sin(\omega)}{\cos(\alpha_s)}$$

$$\sin(\gamma_s) = \frac{\cos(-18,04)\sin(45)}{\cos(14,5)}$$

- γ_s = 0,7677 Rad ou 43,98°

La géométrie solaire

- L'ombrage en rangée



Réf : Guide de conception Viessmann

La géométrie solaire

- Quel sera l’angle d’incidence du soleil sur un panneau incliné à 45º et orienté à 10º à l’ouest du sud à Montréal, trois heures après midi le 31 octobre?

La géométrie solaire

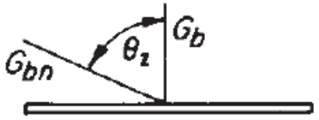
- Pour concevoir des systèmes solaires et/ou effectuer des calculs de performance, il est souvent nécessaire pour calculer le rayonnement **horaire** sur une surface *inclinée* de se servir de mesures ou d'estimations du rayonnement solaire sur une surface *horizontale* située au même endroit géographique.
- En fait, les données les plus couramment disponibles sont celles du rayonnement total horaire ou quotidien sur une surface horizontale, alors que le besoin est de déterminer ce qui frappe un collecteur incliné et orienté dans une direction particulière.

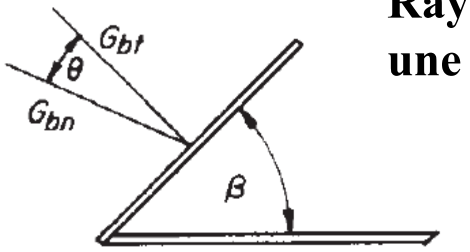
La géométrie solaire

- Le facteur géométrique R_b, le rapport du rayonnement du faisceau sur la surface inclinée à celui sur une surface horizontale à tout instant, peut être calculé exactement par l'utilisation appropriée de

$$\begin{aligned}\cos\theta &= \sin\delta\sin\varphi\cos\beta - \sin\delta\cos\varphi\sin\beta\cos\gamma \\ &+ \cos\delta\cos\varphi\cos\beta\cos\omega + \cos\delta\sin\varphi\sin\beta\cos\gamma\cos\omega \\ &+ \cos\delta\sin\beta\sin\gamma\sin\omega\end{aligned}$$

Rayonnement direct sur une surface horizontale

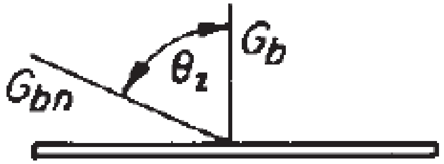


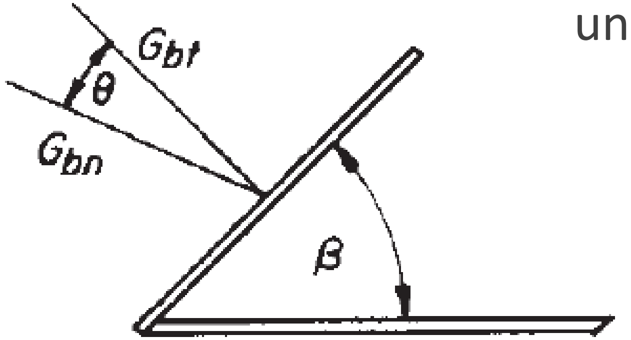


Rayonnement direct sur une surface inclinée

La géométrie solaire

Rayonnement direct sur une surface horizontale





Rayonnement direct sur une surface inclinée

- Le rapport $G_{b,T}/G_b$ est alors:

$$R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} = \frac{G_{b,n}\cos\theta}{G_{b,n}\cos\theta_z} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z}$$

La géométrie solaire

- Cette expression en apparence simple, est en fait assez complexe à calculer et ici encore des simplifications existent:
  - Dans l'hémisphère nord, on installe les collecteurs face au sud et γ =0. Ainsi:

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta)\cos\delta\cos\omega + \sin(\phi - \beta)\sin\delta}{\cos\phi\cos\delta\cos\omega + \sin\phi\sin\delta}$$

  - Dans l'hémisphère sud, on installe les collecteurs face au nord et γ =180. Ainsi:

$$R_b = \frac{\cos(\phi + \beta)\cos\delta\cos\omega + \sin(\phi + \beta)\sin\delta}{\cos\phi\cos\delta\cos\omega + \sin\phi\sin\delta}$$

La géométrie solaire

- Pour éviter des calculs, avant l'avènement des divers logiciels de conception, Hottel et Woertz (1942) ont proposé des graphiques qui permettent de résoudre ces équations. Ils furent révisés en 1975 par Whillier et leur adaptation par Duffie et Beckman est proposée ici:

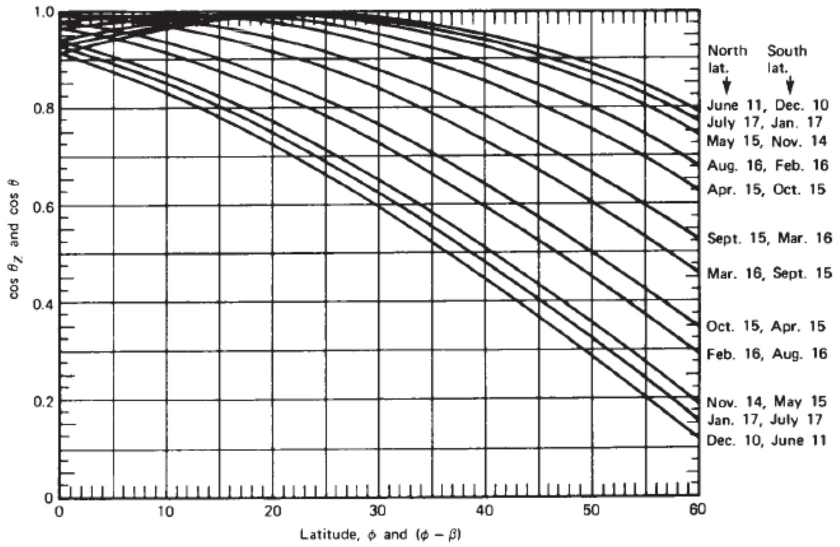


Figure 1.8.2(a) $\cos\theta$ versus $\phi - \beta$ and $\cos\theta_z$ versus ϕ for hours 11 to 12 and 12 to 1 for surfaces tilted toward the equator. The columns on the right show dates for the curves for north and south latitudes. In south latitudes, use $|\phi|$. Adapted from Whillier (1975).

La géométrie solaire

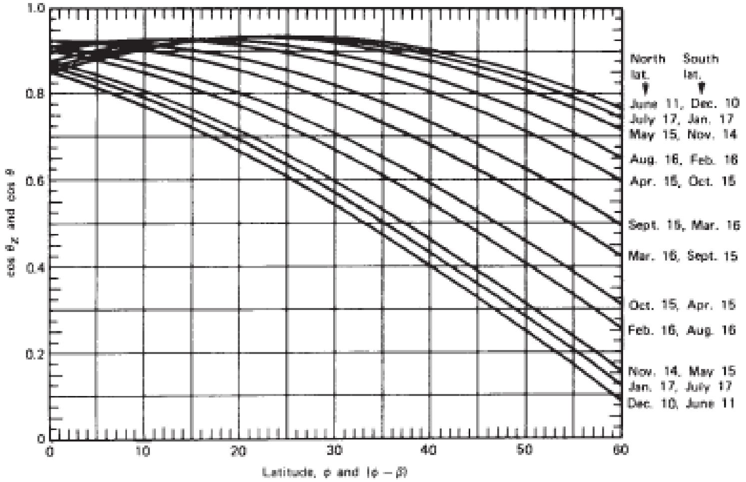


Figure 1.8.2(b) cos θ versus $\phi - \beta$ and cos θ_z versus ϕ for hours 10 to 11 and 1 to 2.

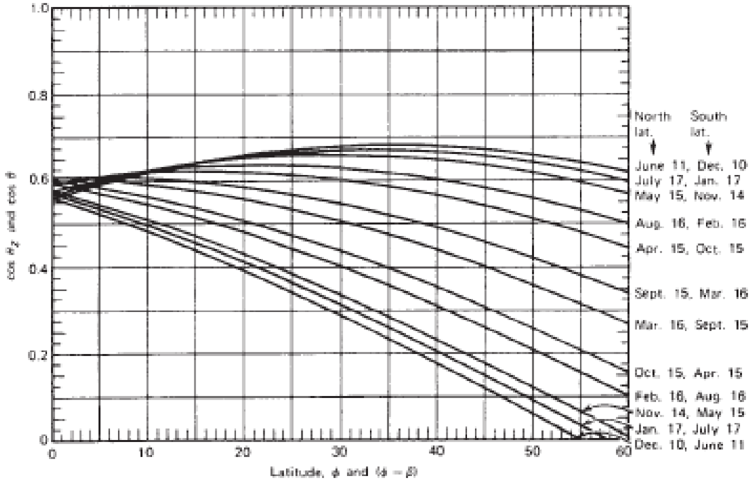


Figure 1.8.2(d) cos θ versus $\phi - \beta$ and cos θ_z versus ϕ for hours 8 to 9 and 3 to 4.

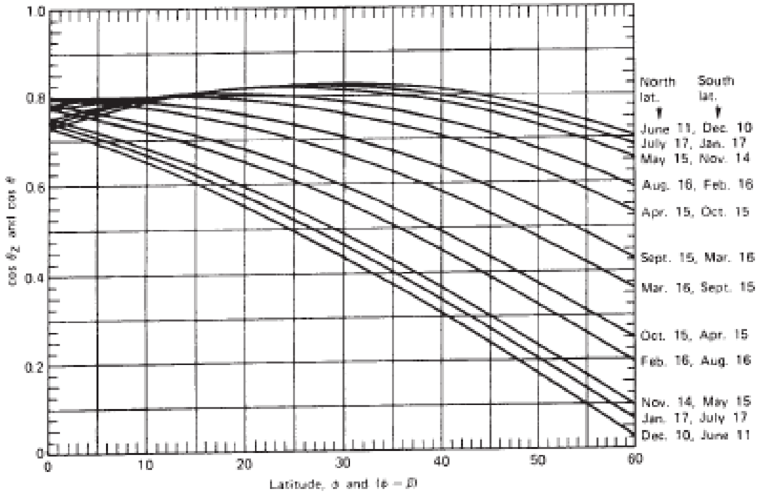


Figure 1.8.2(c) cos θ versus $\phi - \beta$ and cos θ_z versus ϕ for hours 9 to 10 and 2 to 3.

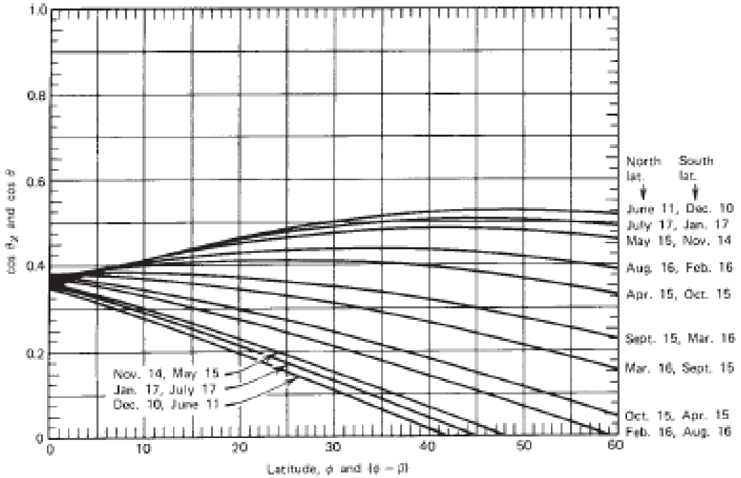


Figure 1.8.2(e) cos θ versus $\phi - \beta$ and cos θ_z versus ϕ for hours 7 to 8 and 4 to 5.

La géométrie solaire

- Il existe en fait, pour ne pas superposer trop des courbes, 5 de ces graphiques.
  - cos θ versus $\varphi - \beta$ and cos θ_z versus φ, for hours 11 to 12 and 12 to 1.
  - cos θ versus $\varphi - \beta$ and cos θ_z versus φ, for hours 10 to 11 and 1 to 2.
  - cos θ versus $\varphi - \beta$ and cos θ_z versus φ, for hours 9 to 10 and 2 to 3.
  - cos θ versus $\varphi - \beta$ and cos θ_z versus φ, for hours 8 to 9 and 3 to 4.
  - cos θ versus $\varphi - \beta$ and cos θ_z versus φ, for hours 7 to 8 and 4 to 5.

- Les heures sont évidemment présentées ici sous la forme am et pm
- Les heures avant 7 am et après 5 pm (temps solaire), ne sont pas assez productive pour que l'on fasse des calculs. Et ce même en été

La géométrie solaire

- Ces courbes ne seront pas employées dans ce cours d'introduction à l'énergie solaire.
- Ces courbes peuvent aujourd'hui être employées principalement pour :
  - Comprendre comment sont construits les logiciels de calculs solaires;
  - Effectuer une vérification de la correcte implantation des équations pour θ et θ_z dans des codes maison.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Le temps solaire
- La géométrie solaire
- ***Conclusion***

Conclusion

- Il faut quantifier l'énergie qui arrive à un endroit précis avant de commencer tout calcul ou conception de système;
- Ces calculs sont faits à partir de données implantées dans un code maison ou carrément avec des logiciels qui calculent les productions énergétiques thermiques et/ou photovoltaïques;
- Il n'existe pas une seule manière ou un unique outil pour dimensionner correctement un système d'énergie solaire.

Conclusion

- Procédure pour calculer l'irradiance (W/m²) reçue par une surface
  1. L'équation du temps et le temps solaire (T_S)
  2. Temps solaire en angle (ω), latitude (ϕ) et déclinaison solaire (δ)
  3. Position du soleil au moment choisi (α_S , θ_Z, γ_S)
  4. Position de la surface au moment choisi (β, γ)
  5. Angle d'incidence sur la surface (θ)
  6. Calcul des temps solaires du lever et du coucher du soleil
  7. Calcul du ratio R_{b_moy} pour n'importe quelle incidence*
  8. Détermination des composantes directe, diffuse et réfléchie à partir de la source de données choisie ou à partir d'un modèle*
  9. Obtention de l'irradiance globale avec le modèle de ciel choisi (isotrope ou autre)*

*pas au programme

Merci de votre attention !

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

Période de questions