

Les énergies renouvelables production et stockage

Le gisement solaire

1. Généralités sur le soleil et la terre;
2. Equations fondamentales;
3. Rôle de l'atmosphère dans l'extinction du rayonnement;
4. Les composantes au sol du rayonnement;
5. Le rayonnement terrestre, bilan radiatif.

1. Généralités sur le soleil et la terre;

1. Généralités sur le soleil et la terre;
2. Equations fondamentales;
3. Rôle de l'atmosphère dans l'extinction du rayonnement;
4. Les composantes au sol du rayonnement;
5. Le rayonnement terrestre, bilan radiatif.

La trajectoire est une ellipse de faible excentricité,
contenue dans un plan passant par le soleil:
c'est le **plan de l'Ecliptique**

Durée de révolution = 365 jours et 1/4

La terre tourne aussi autour de l'axe polaire dont la direction est peu variable

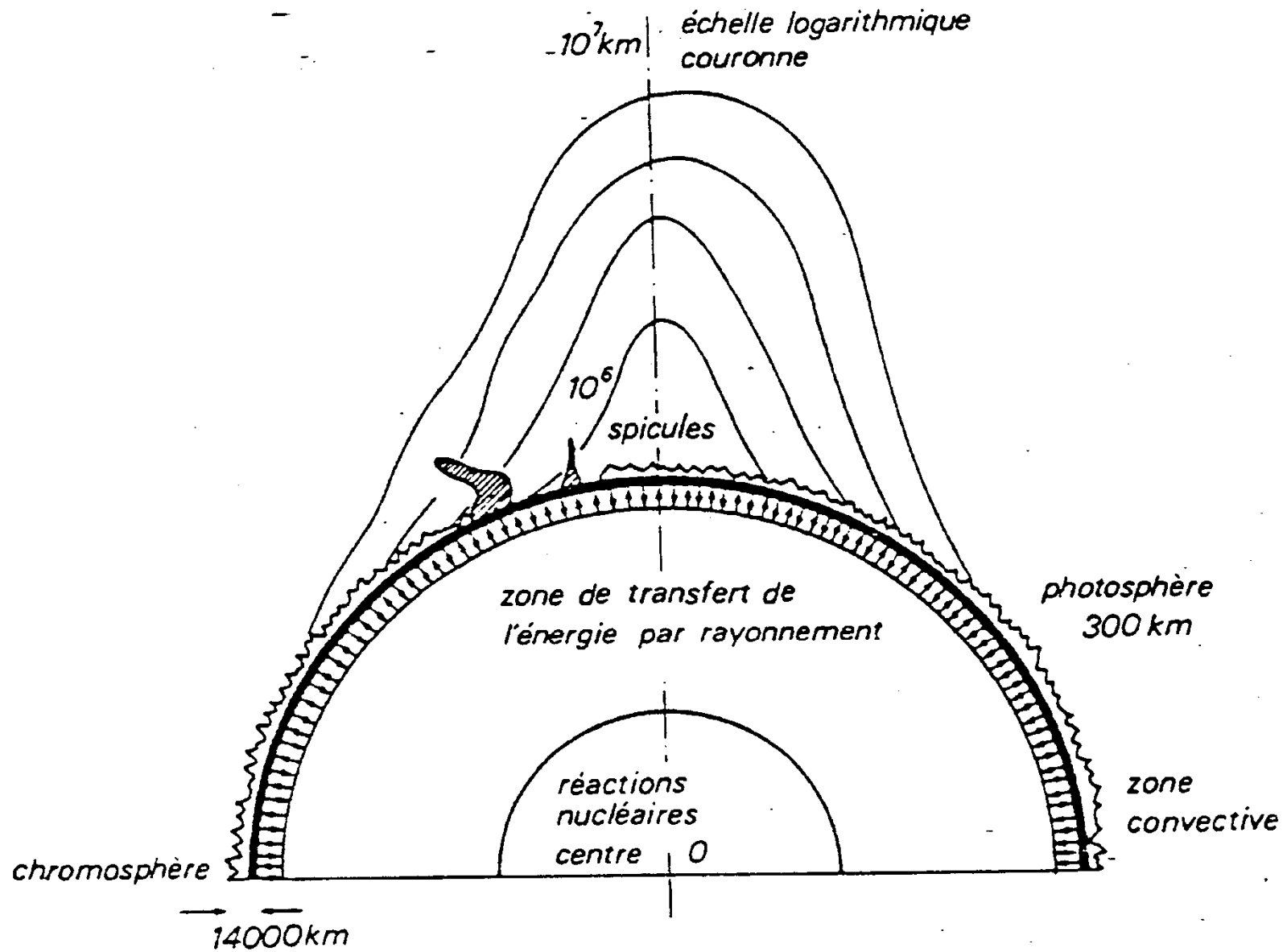
Le soleil est une énorme sphère incandescente de plasma
de température d'émission 5750°K ;

Rayon du soleil $\approx 700\,000\text{ km}$;

Distance terre – soleil ≈ 150 millions de km;

Le soleil n'est pas une sphère homogène; 3 régions :

1. **Intérieur** : 16 millions de degrés, un million d'atmosphères;
2. **Photosphère** : mince, 300 km, quelques milliers de degrés.
Température de surface 4500°K , pression 1/100 d'atmosphères
(globalement le soleil rayonne comme corps noir à 5800°K ;
3. **Chromosphère** : région à faible densité, 1 million de degrés, formation de jets.

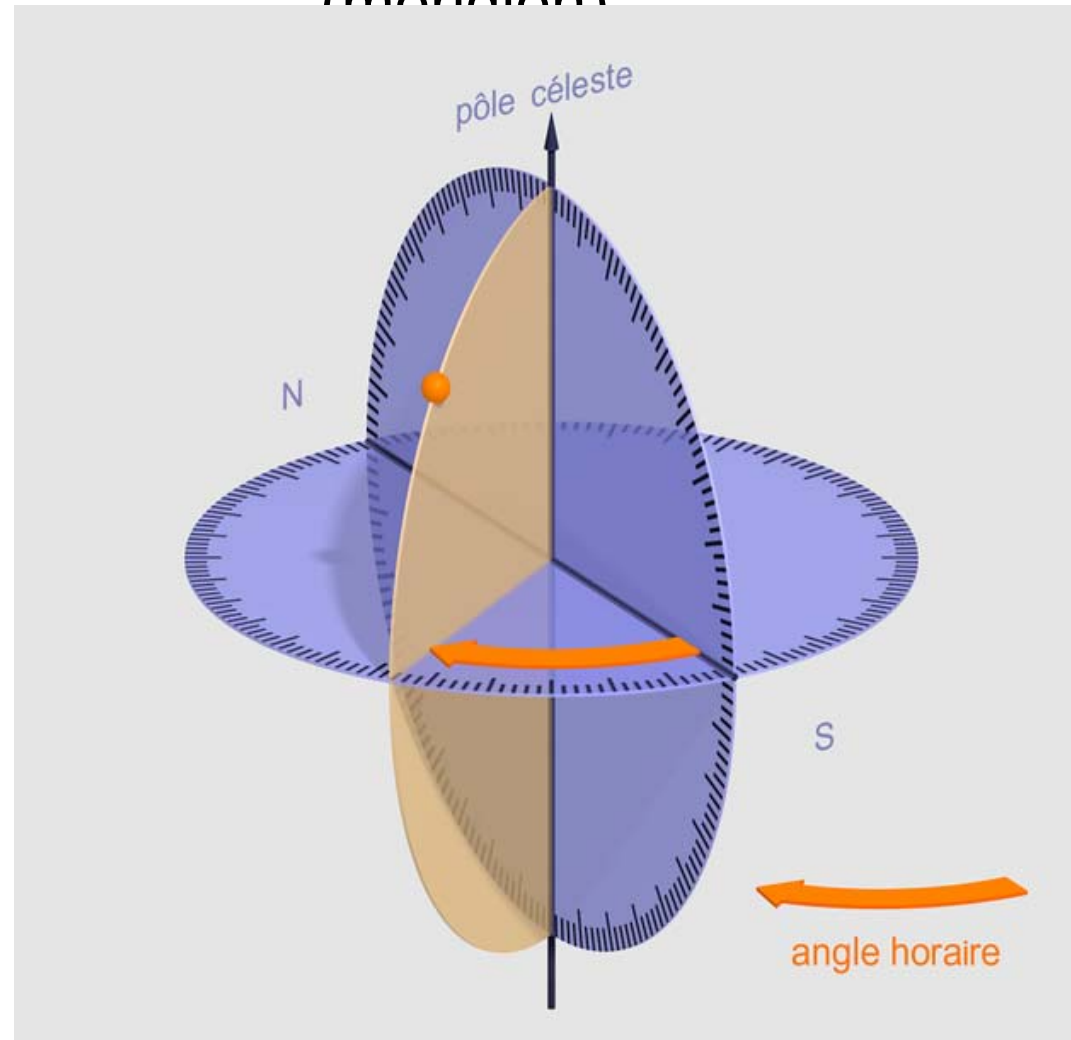


1. Emittance solaire de 6600 W/cm^2 ;
 2. A la limite de l'atmosphère, **constante solaire** 1353 W/m^2
- Si on prend pour **unité** la distance moyenne annuelle terre – soleil :
1. La distance minimale (0,983) se produit au solstice d'hiver (22 décembre);
 2. La distance maximale (1,017) se produit au solstice d'été (22 juin);
 3. La distance moyenne se produit aux équinoxes d'automne et de printemps (23 sept et 21 mars);
 4. Constante solaire, valeur moyenne 1353 W/m^2 , 1396 W/m^2 solstice hiver, 1304 W/m^2 solstice été.
- La terre est animée d'un mouvement de rotation autour de son axe polaire, alternance jour – nuit.

La **déclinaison solaire** est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan équatorial.

1. $+23^\circ 27'$ au solstice d'été;
2. $-23^\circ 27'$ solstice d'hiver;
3. Zéro degré aux équinoxes de printemps et d'automne;
4. Au moment des équinoxes, durée du jour = durée de la nuit en tous points de la terre, à l'équateur cette égalité est maintenue tout au long de l'année quelque soit la déclinaison solaire.

L'**angle horaire** (AH) : est l'angle formé par le méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu (méridien)



Source : wikipedia.org

Le **temps solaire vrai** (TSV) : il est défini par l'angle horaire. Il est midi TSV si $AH = 0$.

Le **temps solaire moyen** (TSM) : il est défini par l'angle qui correspondrait à une rotation uniforme de la terre à la fois sur elle-même et autour du soleil. L'écart entre le TSV et le TSM est donné par l'**équation du temps**, il varie de ± 16 mn.

Le **temps universel** (TU) : est le temps solaire moyen du méridien de Greenwich (ou GMT; Greenwich Mean Time).

Le **temps légal** (TL) : il est lié au TU par un nombre entier d'heures qui dépend de la longitude (en principe une heure pour 15° de longitude).

Pour les applications de l'énergie solaire, on a besoin de connaître le **temps solaire vrai** (TSV)

Tableau 1-

Date	Numéro des jours à partir du 1er janvier	Numéro des jours à partir du 21 mars	Correction de distance Terre-Soleil %	Correction de temps mn et s	Déclinaison du Soleil en degrés et dixièmes	Constante solaire (W/m ²) base : 1350 W/m ²
Janvier 1	1	286	+ 3,4	- 3 22	- 23,0	1396
8	8	293	+ 3,4	- 4 04	- 22,3	1396
15	15	300	+ 3,4	- 9 12	- 21,1	1396
22	22	307	+ 3,2	- 11 28	- 19,7	1393
29	29	314	+ 3,1	- 13 07	- 18,0	1392
Février 1	32	317	+ 3,0	- 13 38	- 17,1	1391
8	39	324	+ 2,8	- 14 23	- 15,0	1388
15	46	331	+ 2,5	- 14 27	- 12,7	1384
22	53	338	+ 2,2	- 13 54	- 10,2	1380
Mars 1	60	345	+ 1,9	- 12 47	- 7,6	1376
8	67	352	+ 1,5	- 11 12	- 4,9	1370
15	74	359	+ 1,2	- 9 16	- 2,2	1366
22	81	1	+ 0,8	- 7 07	+ 0,6	1361
29	88	8	+ 0,4	- 4 53	+ 3,4	1355
Avril 1	91	11	0,0	- 3 57	+ 4,5	1350
8	98	18	- 0,2	- 2 08	+ 7,2	1347
15	105	25	- 0,6	+ 0 13	+ 9,7	1342
22	112	32	- 1,0	+ 1 23	+ 12,2	1337
29	119	39	- 1,3	+ 2 35	+ 14,4	1332
Mai 1	121	41	- 1,5	+ 2 58	+ 15,1	1330
8	128	48	- 1,9	+ 3 32	+ 17,1	1324
15	135	55	- 2,2	+ 3 39	+ 18,9	1320
22	142	62	- 2,5	+ 3 20	+ 20,4	1316
29	149	69	- 2,7	+ 2 37	+ 21,6	1314
Juin 1	152	72	- 2,8	+ 2 13	+ 22,0	1312
8	159	79	- 3,1	+ 1 05	+ 22,8	1308
15	166	86	- 3,2	+ 0 14	+ 23,3	1307
22	173	93	- 3,3	- 1 38	+ 23,4	1305
29	180	100	- 3,4	- 3 00	+ 23,2	1304

Date	Numéro des jours à partir du 1er janvier	Numéro des jours à partir du 21 mars	Correction de distance Terre-Soleil %	Correction de temps mn et s	Déclinaison du Soleil en degrés et dixièmes	Constante solaire (W/m ²) base : 1350 W/m ²
Juillet	1	102	- 3,4	- 3 23	+ 23,1	1304
	8	109	- 3,4	- 4 33	+ 22,5	1304
	15	116	- 3,3	- 5 28	+ 21,5	1310
	22	123	- 3,2	- 6 02	+ 20,3	1307
	29	130	- 3,1	- 6 11	+ 18,8	1308
Août	1	133	- 3,0	- 6 07	+ 18,0	1310
	8	140	- 2,8	- 5 37	+ 16,2	1312
	15	147	- 2,6	- 4 38	+ 14,1	1315
	22	154	- 2,3	- 3 12	+ 11,8	1319
	29	161	- 2,0	- 1 21	+ 9,4	1323
Sept.	1	164	- 1,8	- 0 27	+ 8,3	1326
	8	171	- 1,5	+ 2 07	+ 5,7	1330
	15	178	- 1,1	+ 4 20	+ 3,1	1335
	22	185	- 0,7	+ 6 54	+ 0,4	1341
	29	192	- 0,3	+ 9 23	- 2,4	1346
Octobre	1	194	- 0,2	+ 10 04	- 3,2	1347
	8	201	+ 0,2	+ 12 17	- 5,9	1353
	15	208	+ 0,6	+ 14 08	- 8,5	1358
	22	215	+ 1,0	+ 15 30	- 11,0	1364
	29	222	+ 1,4	+ 16 16	- 13,4	1369
Novembre	1	225	+ 1,6	+ 16 25	- 14,4	1372
	8	232	+ 1,9	+ 16 15	- 16,6	1376
	15	239	+ 2,3	+ 15 25	- 18,5	1381
	22	246	+ 2,5	+ 13 54	- 20,1	1384
	29	253	+ 2,8	+ 11 47	- 21,5	1388
Décembre	1	255	+ 2,9	+ 11 05	- 21,8	1389
	8	262	+ 3,1	+ 8 19	- 22,7	1392
	15	269	+ 3,2	+ 5 12	- 23,3	1393
	22	276	+ 3,3	+ 1 53	- 23,4	1395
	29	283	+ 3,4	- 1 29	- 23,2	1396

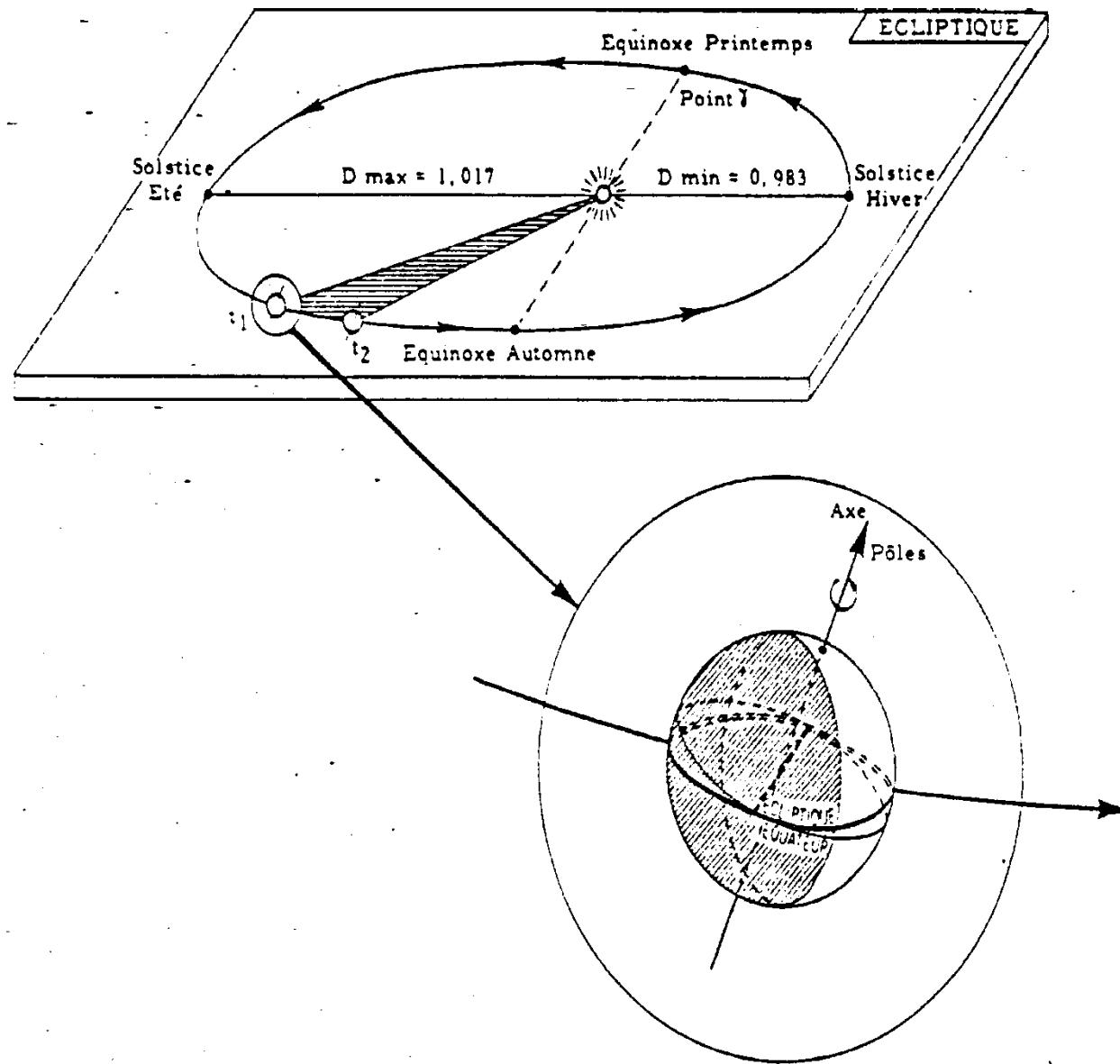


FIG. 2. — Mouvements de la Terre autour du Soleil et sur elle-même.

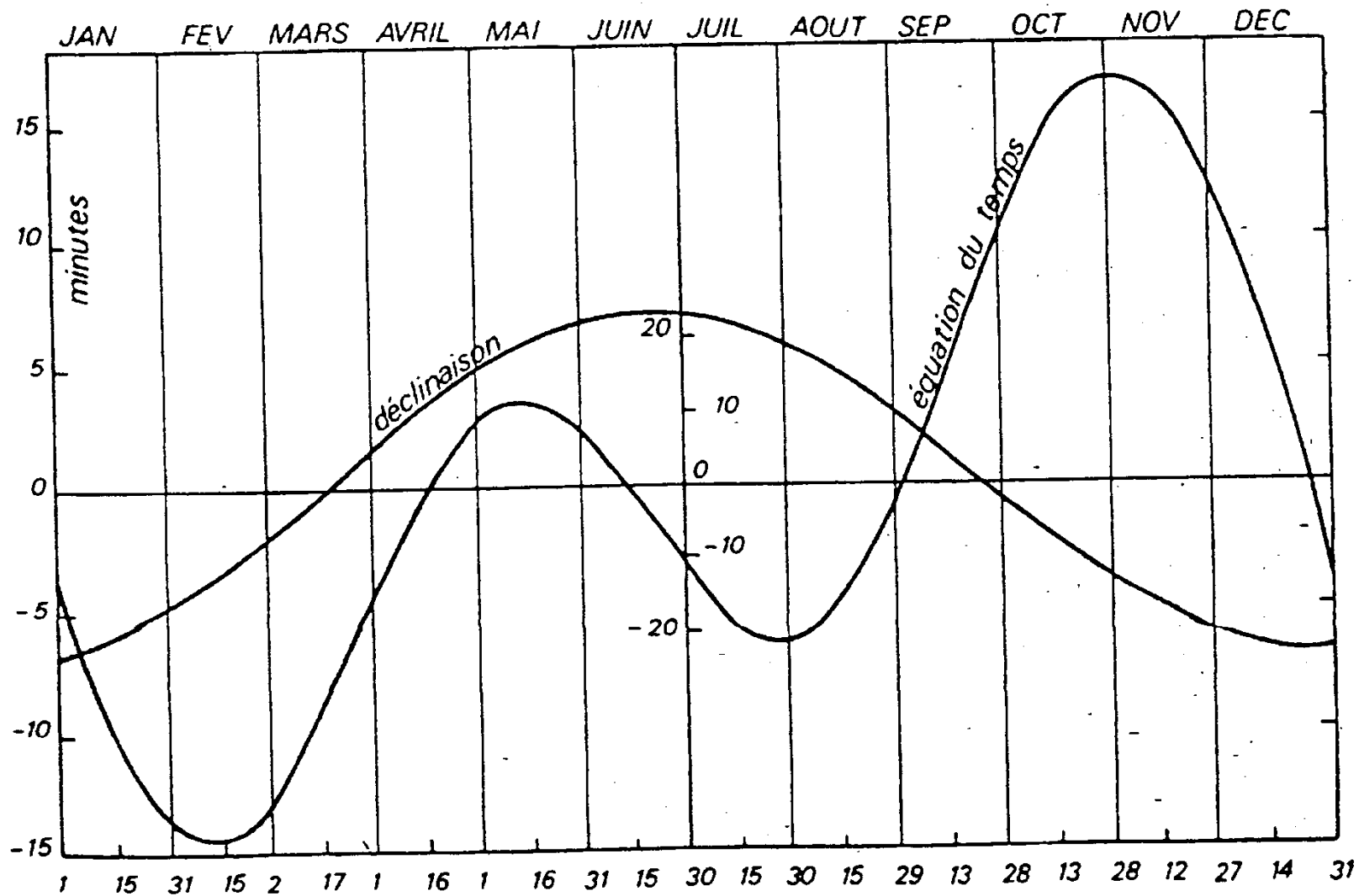


Fig. 3. Equation du temps et variation de la déclinaison:

Un exemple

Il est 16 h 38 mn (heure légale) le 01 octobre à Paris (2° est).
Trouver le temps solaire vrai

Il est 16 h 38 mn – 1h = 15h 38 mn (TU, GMT)

Soit :

$$\begin{array}{l} 15 \text{ h } 38 \text{ mn} + \quad 4 \times 2^\circ \quad = 15 \text{ h } 46 \text{ mn (TSM, méridien} \\ \text{de Paris)} \quad \quad \quad \textit{correction de longitude} \end{array}$$

Soit :

$$15 \text{ h } 46 \text{ mn} + \quad 10 \quad = 15 \text{ h } 56 \text{ mn (TSV de Paris)}$$

équation du temps

Définition

Une énergie renouvelable est une énergie qui se renouvelle constamment, elle provient de sources énergétiques dites renouvelables, telles que:

1. Hydraulique;
2. Biomasse;
3. Solaire (~ 4,9 millions d'années);
4. Géothermique;
5. Eolienne.

Caractéristiques de base des énergies renouvelables

Disponibles et inépuisables

Applications :

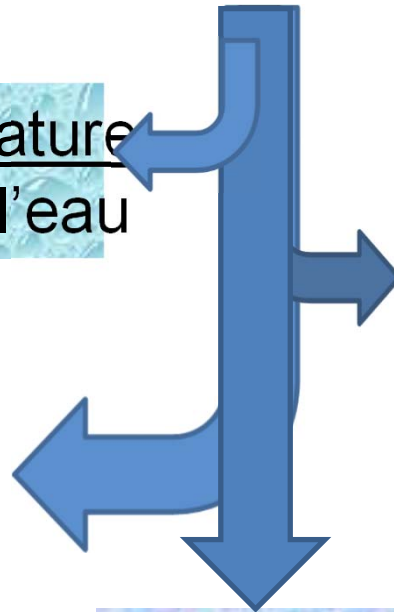
Solaire à basse température
Chauffage sanitaire de l'eau

Energie éolienne,
générée par les vents issus de turbulences causées par le réchauffement de l'atmosphère

Solaire à haute température:
Concentration, fluides à haute température, fonctionnement turbines pour générer de l'électricité

Photovoltaïque ou électricité solaire:

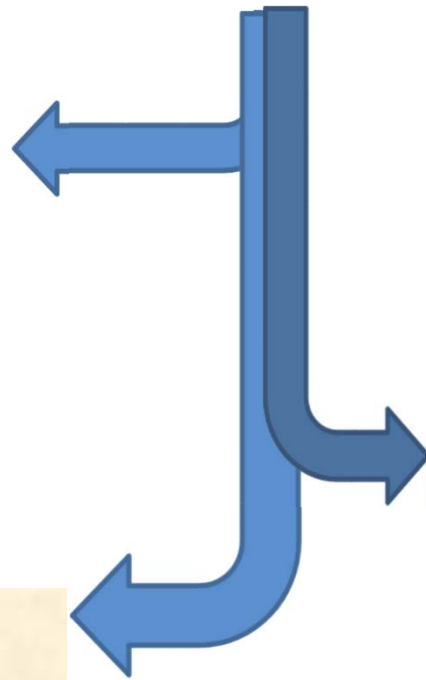
Technologie des semiconducteurs



Energie

géothermique, eau chaude ou vapeur, pour chauffage ou production électricité

Puissance hydraulique, liée au rayonnement solaire. Évaporation de l'eau des océans, pluie, remplissage des barrages, puis production de l'électricité. On parle des centrales hydro-électriques



La biomasse, ou déchets organiques.

Remarques importantes


La plupart des énergies renouvelables sont de nature intermittente.

1. Le soleil n'est pas disponible la nuit;
2. Le vent n'est pas régulièrement disponible, même pour les sites réputés favorables aux grands vents;

Les énergies :

1. Géothermique;
2. Biomasse;
3. Et puissance hydraulique.

Font l'exception en ce qui concerne la nature intermittente.



Contourner le problème de l'intermittence par le stockage en périodes de disponibilité et déstockage en périodes d'indisponibilité de cette énergie.

Dispositifs de stockage ?

Coûts ?

Centrales hydrauliques

Les petites centrales

1. Les PCH sont des installations dont la puissance est environ inférieure à 5 MW;
2. La durée de vie de ces centrales est relativement importante;
3. La production d'énergie est locale;
4. Prix de l'énergie produite très compétitif.

Exemples de prix

1. Avec 30 m de chute, débit de 1 à 5 l/sec, 0,3 à 1,5 kW: environ 4600 à 9000 €;
2. Avec 30 m de chute, débit de 4 à 30 l/sec, 1,5 à 10 kW: environ 11000 à 28000 €;
3. De 10 à 160 m de chute, débit de 10 à 60 l/sec, de 1 à 100 kW: environ 20000 à 46000 €;
4. Basse chute (3 à 6 m), débit de 350 à 450 l/sec, de 5 à 10 kW, environ 40000 à 46000 €;
5. Moyenne chute (8 à 60 m), 50 à 1500 l/sec, de 4 à 90 kW, à partir de 25000 €.

Conclusion

- Pas de problèmes d'intermittence;
- Durée de vie des installations élevées;
- Maintenance faible;
- Production énergétique locale;
- Technologie simple et robuste (turbines);
- Coûts intéressants d'énergie
- Bonne solution pour sites isolés

2. Equations fondamentales;

1. Généralités sur le soleil et la terre;
2. Equations fondamentales;
3. Rôle de l'atmosphère dans l'extinction du rayonnement;
4. Les composantes au sol du rayonnement;
5. Le rayonnement terrestre, bilan radiatif.

L'**angle horaire** (AH) : ayant déterminé le TSV, on calcule facilement l'angle horaire par la formule :

$$AH = \frac{360}{24}(12 - TSV)$$

TSV en heures, AH en degrés

Si TSV = 12 h, alors AH = 0

Un écart d'une heure correspond à ± 15 degrés d'angle horaire (c'est la largeur du fuseau horaire)

La **hauteur du soleil** : h

C'est la hauteur angulaire du soleil au dessus de l'horizon

$$\sin(h) = \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(AH)$$

φ La **latitude** : en degrés

δ La **déclinaison solaire** : en degrés

Azimut du soleil : a

C'est l'angle entre la projection du rayon solaire sur le plan horizontal du lieu et la direction sud

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta)\sin(AH)}{\cos(h)}$$

Applications

Calcul de la durée astronomique du jour

C'est le temps écoulé entre le lever et le coucher du soleil pour un ciel dégagé (sans tenir compte de la réfraction atmosphérique)

Au coucher et au lever du soleil $\sin(h) = 0$

on a :

$$\cos(AH) = -\operatorname{tg}(\varphi)\operatorname{tg}(\delta) \begin{cases} \text{signe} + \text{lever} \\ \text{signe} - \text{coucher} \end{cases}$$

On déduit le TSV_{lever} et TSV_{coucher} et par différence la durée astronomique du jour, qui sera aussi la durée potentielle d'insolation SS_0

SS_0 peut être aussi donnée par la formule approchée suivante :

$$SS_0(\text{en heures}) = 12 + \theta \sin\left(\frac{360}{365} d\right)$$

Avec d : le nombre de jours écoulés depuis le 21 mars
et θ : coefficient fonction de la latitude

Calcul du rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère

L'irradiation solaire reçue à la limite de l'atmosphère sur une surface horizontale unitaire pendant une journée s'obtient ainsi :

Pendant le temps dt , la surface unitaire reçoit l'énergie :

$$dG_0 = P' \sin(h) dt$$

Avec P' la constante solaire corrigée de la variation de distance terre – soleil.
Au cours d'une journée, l'énergie reçue sera :

$$G_0 = P' \int_{h \text{ lever}}^{h \text{ coucher}} (\sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(AH)) dt$$

On a :
$$\begin{cases} d(AH) = 15dt \text{ (en degrés);} \\ \text{ou } d(AH) = \frac{2\pi}{24} dt \text{ (en radians)} \end{cases}$$

Soit :
$$G_0 = \frac{24}{2\pi} P' [\sin(\varphi)\sin(\delta)(AH_{\text{coucher}} - AH_{\text{lever}}) + \cos(\varphi)\cos(\delta)(\sin(AH_{\text{coucher}}) - \sin(AH_{\text{lever}}))]$$

Or :

$$AH_{\text{coucher}} = -AH_{\text{lever}} = \arccos(-\operatorname{tg}(\varphi)\operatorname{tg}(\delta))$$

D'où :

$$G_0 = \frac{24}{\pi} P' \left[\sin(\varphi)\sin(\delta) \left(\arccos(-\operatorname{tg}(\varphi)\operatorname{tg}(\delta)) \right) + \cos(\varphi)\cos(\delta) \left(\sin \left(\arccos(-\operatorname{tg}(\varphi)\operatorname{tg}(\delta)) \right) \right) \right] \text{ en Wh/m}^2$$

Le tableau de valeurs suivant donne les moyennes mensuelles des irradiations journalières pour différentes latitudes.

On remarque que :

1. L'irradiation au solstice d'été est importante et que les calottes polaires sont plus favorisées que les régions équatoriales;
2. Sur l'année, c'est l'équateur qui reçoit l'énergie quotidienne moyenne maximale : 10 kWh/m² hors atmosphère.

Tableau 2.

Variations mensuelles des sommes quotidiennes du rayonnement solaire extra-terrestre
(exprimées en $\text{kil.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$). Constante solaire : 1350 kil.m^{-2} .

ϕ	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
70°N	0,027	0,864	3,027	6,375	9,509	11,33	10,45	7,607	4,366	1,554	0,161	---
60°N	1,015	2,454	4,834	7,500	9,857	11,12	10,55	8,438	5,813	3,080	1,339	0,670
50°N	2,513	4,071	6,151	8,545	10,54	11,25	10,60	9,161	7,098	4,741	2,893	2,176
40°N	4,125	6,571	7,500	8,321	10,63	11,25	10,90	9,830	8,143	6,212	4,527	3,750
30°N	6,759	7,045	8,525	9,564	10,60	11,06	10,85	10,18	9,054	7,554	6,161	5,357
20°N	7,759	8,280	9,455	10,16	10,55	10,66	10,55	10,23	9,670	8,732	7,554	6,991
10°N	8,678	8,375	8,954	10,16	10,07	10,02	10,02	10,07	9,954	9,509	8,839	8,436
Equat.	9,777	10,07	10,16	9,954	9,455	9,054	9,161	9,616	9,954	10,07	9,857	9,670
10°S	10,51	10,55	10,13	8,321	6,438	7,929	8,089	8,839	9,670	10,29	10,55	10,61
20°S	11,25	10,71	8,857	6,438	7,232	6,536	6,750	7,821	9,107	10,23	11,01	11,33
30°S	11,93	10,61	6,107	7,313	5,613	5,036	5,250	6,643	8,277	10,02	11,20	11,73