## Les saisons

Pierre Causeret, ENS-Lyon/Ifé Publié par Gérard Vidal

### Les saisons

par Pierre Causeret et Gérard Vidal

Date de publication 2015-07-30

#### Résumé

I	√ous trouverez	dans	ce livre	numérique	les	données	scientifiques	et	des	idées	d'activités	pédagogiques	pour
e	enseigner les pl	nénomé	ènes des	saisons.									

## Table des matières

1. 1. Observer	1
A. Ce qui varie d'une saison à l'autre	1
Le mouvement apparent du Soleil	1
Les solstices et équinoxes	2
Les étoiles la nuit	3
B. Des activités pour observer	4
La méridienne	4
Le saladier	5
Relevé d'ombres	6
Durée de la journée	6
Températures	7
Étoile polaire	7
2. 2. Comprendre	
A. Des modèles	
Le modèle géocentrique	
Le modèle héliocentrique	
Comprendre les observations	
B. Des activités pour comprendre	
La distance du Soleil	
Recherche d'un modèle	
Activités avec un globe	
Température et hauteur du Soleil	
Autres calculs	
Conclusion	
3. 3. Compléments	
Solstices et équinoxes	
L'orbite de la Terre	
La précession des équinoxes	
Les variations des paramètres de l'orbite terrestre	
Des maquettes pour comprendre les saisons	26

## Liste des illustrations

1.1. Le mouvement apparent du Soleil vu depuis la France métropolitaine.	- 1
1.2. Le Soleil à midi au cours de l'année	1
1.3. Levers de soleil	. 2
1.4. Couchers de soleil	2
1.5. Le mouvement apparent du ciel au cours de la nuit	. 3
1.6. Les étoiles la nuit	. 3
1.7. Méridienne en cours d'utilisation	
1.8. Le saladier	5
1.9. Relevé d'ombres en cours	6
1.10. Heures de lever et couchers du soleil	7
1.11. L'Étoile polaire et la la Grande Ourse	. 8
2.2. Le système héliocentrique	11
2.3. Orbite terrestre	11
2.4. Hauteur du soleil à midi	12
2.5. La direction du lever du Soleil	12
2.6. La durée de la journée, vue 1	13
2.7. La durée de la journée, vue 2	13
2.8. Le ciel de nuit	
2.9. Photos du soleil les 13 janvier, 25 avril, 22 juin, 23 septembre	14
2.10. Soleil-Terre à l'échelle	15
2.11. Matériel pour comprendre: Terre et gnomon	15
2.12. Gnomon et points cardinaux fixés sur un globe du commerce.	
2.13. Globe à 26 faces.	
2.14. Hauteur du Soleil à midi	17
2.15. Direction du lever et du coucher	
2.16. Modélisation de l'éclairement de la terre	19
2.17. Modélisation de l'éclairement : mesure avec un luxmètre	
2.18. Calcul de l'énergie arrivant au sol	
2.19. Calcul de la hauteur du Soleil à midi aux solstices à une latitude φ	
2.20. Calcul de la durée de la journée aux solstices à la latitude φ	
3.1. Orbite de la Terre : solstices et équinoxes	
3.2. L'orbite de la Terre représentée comme une ellipse fortement exagérée.	
3.3. La précession des équinoxes	
3.4. Les saisons présentées par les élèves du collège de Limas (69)	26

## Liste des tableaux

1.1.	Température moyenne à Paris (France)	. 7
1.2.	Température movenne à Melbourne (Australie)	. 7

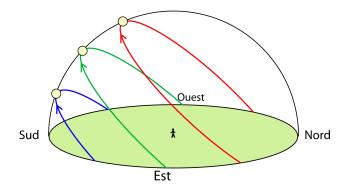
## Chapitre 1. 1. Observer

Pour bien comprendre les saisons, il ne suffit pas de savoir qu'il fait plus chaud en été qu'en hiver. Il faut avoir observé auparavant ce qui change au cours de l'année pour pouvoir l'intégrer dans un modèle.

## A. Ce qui varie d'une saison à l'autre

### Le mouvement apparent du Soleil

Figure 1.1. Le mouvement apparent du Soleil vu depuis la France métropolitaine.



En bleu: au solstice d'hiver (21 décembre).

En vert : aux équinoxes (20 mars et 22 septembre).

En rouge: au solstice d'été (21 juin).

Sur la figure on remarque tout d'abord que la hauteur du Soleil à midi (quand il passe plein sud, au plus haut dans le ciel) varie au cours de l'année.

Figure 1.2. Le Soleil à midi au cours de l'année



La hauteur du soleil au-dessus de l'horizon sud varie ici de 19° (photo de gauche) à 66° (photo de droite)

Au solstice d'hiver. À l'équinoxe de printemps. Au solstice d'été

On peut aussi observer sur la figure 1.1 que le Soleil ne se lève pas toujours au même point de l'horizon Est et ne se couche pas non plus au même point de l'horizon Ouest.

C'est ce que révèlent aussi les photos ci-dessous : Entre le lever au solstice d'hiver et au solstice d'été, l'écart est de plus de 70°, de même qu'entre les couchers du Soleil au solstice d'hiver et au solstice d'été.

Figure 1.3. Levers de soleil



La photo est prise vers l'Est : au solstice d'été le soleil se lève vers le Nord-Est, au solstice d'hiver vers le Sud-Est

Figure 1.4. Couchers de soleil



La photo est prise vers l'Ouest : au solstice d'été le soleil se couche vers le Nord-Ouest, au solstice d'hiver vers le Sud-Ouest

### Les solstices et équinoxes

Le mot solstice vient de sol (le Soleil) et stitium (pour statium, de stare, s'arrêter).

En effet, au solstice d'hiver, le Soleil s'arrête de se lever de plus en plus vers le sud, il s'arrête de baisser dans le ciel à midi et il s'arrête aussi de se coucher de plus en plus vers le sud.

Au solstice d'été, c'est la même chose en remplaçant sud par nord et baisser par monter :

Au solstice d'été, le Soleil s'arrête de se lever de plus en plus vers le nord, il s'arrête de monter dans le ciel à midi et il s'arrête aussi de se coucher de plus en plus vers le nord.

Le mot équinoxe vient de aequus (égal) et nox (la nuit). Le jour de l'équinoxe, la durée de la journée est égale à la durée de la nuit. On devrait donc avoir 12 heures entre le lever du Soleil et son coucher.

En fait, si l'on vérifie, on s'aperçoit que ce n'est pas exact. Ce serait vrai s'il n'y avait pas d'atmosphère. Mais le phénomène de réfraction (déviation des rayons lumineux par l'atmosphère) nous fait voir le Soleil à l'horizon un peu plus haut qu'il n'est en réalité. Ce qui augmente la durée de la journée de quelques minutes.

Les dates des solstices et équinoxes

Le solstice d'hiver a lieu le 21 (parfois le 22) décembre et le solstice d'été le 21 (parfois le 20) juin.

L'équinoxe de printemps a lieu le 20 mars et l'équinoxe d'automne le 22 ou le 23 septembre.

#### Les étoiles la nuit

Ce n'est plus le Soleil que l'on voit se déplacer, mais les étoiles, la Lune et les planètes. L'ensemble de la voûte céleste semble tourner autour de l'Étoile polaire.

Etoile polaire

Figure 1.5. Le mouvement apparent du ciel au cours de la nuit

Vue depuis la France métropolitaine. Seule l'Étoile polaire reste quasiment fixe au cours de la nuit

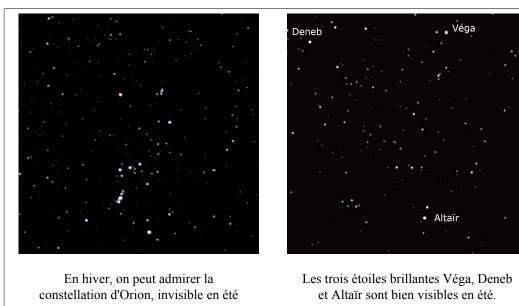
Est

Nord

Le ciel change au cours de la nuit mais aussi au fil des saisons. Par exemple, en hiver, on peut admirer la constellation d'Orion, invisible en été. À l'inverse, les trois étoiles brillantes Véga, Deneb et Altaïr sont bien visibles en été et invisible en hiver.



Sud



## B. Des activités pour observer

Pour se rendre compte par soi-même de toutes les différences d'une saison à l'autre, de nombreuses activités sont possibles.

Elles permettent d'observer tout d'abord que le Soleil est plus haut et que les journées sont plus longues en juin qu'en décembre. Ce sont ces deux phénomènes qui expliquent les variations de température d'une saison à l'autre et qu'il faudra intégrer dans une modélisation.

D'autres observations sur la direction des levers et couchers de Soleil ou sur le ciel nocturne (fixité de l'Étoile polaire) sont intéressantes et pourront confirmer ou infirmer un modèle.

#### La méridienne

Il s'agit d'une activité simple qui permet de cibler un seul objectif : observer les variations de hauteur du Soleil à midi.

#### Matériel nécessaire

Une planchette d'environ 10 cm de large et 40 cm de long.

Un "gnomon" (bâton vertical) de 5 à 10 cm de hauteur.

Figure 1.7. Méridienne en cours d'utilisation



Le gnomon est perpendiculaire à la planchette. On a fixé sur la planchette une feuille sur laquelle on a tracé un axe.

#### Utilisation

On oriente la planchette nord-sud et on note sur la feuille la position de l'extrémité de l'ombre lorsque celle-ci suit l'axe donc quand il est midi au Soleil (le Soleil est au sud et l'ombre est au nord). On répète l'opération à intervalle régulier, toutes les semaines par exemple.

On voit l'ombre s'allonger jusqu'au 21 décembre, le Soleil étant de plus en plus bas, pour raccourcir ensuite jusqu'au 21 juin. Il faut veiller à ce que la planchette soit à peu près horizontale.

Pour mener à bien ce type d'observation avec des élèves, une des difficultés est de prévoir à quel moment l'ombre est dirigée au nord. C'est à midi solaire qui ne correspond en général ni à 13 h ni à 14 h de la montre. Trois méthodes sont possibles :

• on surveille la méridienne jusqu'à ce que l'ombre suive l'axe nord-sud ;

- on cherche sur le site de l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides [http://www.imcce.fr] à quelle heure de la montre il est midi au Soleil sur le lieu de l'expérience (sur www.imcce.fr, choisir éphémérides, lever coucher et passage au méridien, choisir Soleil, la (ou les) date(s), le lieu, demander le calcul et l'heure du passage au méridien vous donne l'heure en temps universel du midi solaire. Il reste à ajouter 1 h si on est en heure d'hiver ou 2 h en heure d'été.
- dernière solution, on calcule l'heure du midi solaire. En partant de 12 h, on ajoute 1 h (en heure d'hiver) ou 2 h (en heure d'été), puis on ajoute la correction en longitude à raison de 4 minutes par degré, en comptant négativement à l'est et positivement à l'ouest de Greenwich (l'heure légale étant réglée sur le méridien de Greenwich). On termine en ajoutant l'« équation du temps », variable en fonction de la date, qui vient du fait que le temps solaire vrai n'est pas régulier.

#### Le saladier

Un saladier transparent peut permettre de visualiser la trajectoire apparente du Soleil au cours de la journée, à des dates différentes.

#### Matériel nécessaire

Un saladier transparent ou une demi-sphère transparente, un socle, des gommettes, un cache percé d'un trou légèrement plus grand que les gommettes.

Figure 1.8. Le saladier



Des gommettes ont déjà été fixées au moment du solstice d'hiver (sur la droite, peu visibles) et au moment de l'équinoxe de printemps (gommettes à mi hauteur). Nous sommes au mois de juin et la dernière série de gommettes est en train d'être positionnée

#### Utilisation

On veut positionner des gommettes représentant le Soleil pour un observateur qui serait situé au centre du saladier et que l'on peut matérialiser par un petit personnage.

Un jour donné à intervalle régulier, chaque heure par exemple, on place une gommette. Pour cela, on positionne le cache pour que la tache lumineuse se trouve au centre du saladier et on fixe la gommette sur le saladier au centre du trou. À la fin de la journée, on obtient une série de gommettes le long d'un arc de cercle représentant la trajectoire apparente du Soleil au cours de la journée.

On peut répéter l'opération 3 jours dans l'année à proximité du solstice de décembre, d'un équinoxe et du solstice de juin. On obtiendra alors quelque chose de proche de la figure 1. Il faut veiller à ce que, pour chacun des jours choisis, le saladier soit remis exactement dans la même position.

#### Relevé d'ombres

On note sur une planchette la position de l'extrémité de l'ombre d'un gnomon au cours d'une journée à intervalle régulier. On voit ainsi les variations de hauteur du Soleil au cours de la journée.

Si on répète l'opération à différentes saisons, on voit alors les variations de hauteur du Soleil au cours de l'année.

Ce type de relevé est plus simple à faire que sur un saladier mais il est aussi moins lisible. Par contre, il permet des mesures de longueur et, par des calculs ou des dessins, des mesures d'angle.

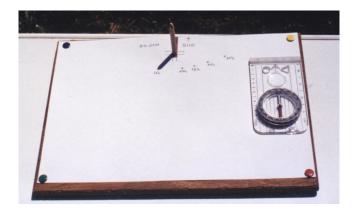
#### Matériel nécessaire

Une planchette d'environ 20 cm de large et 30 cm de long.

Un "gnomon" (bâton vertical) de 3 ou 4 cm de hauteur.

Le gnomon est perpendiculaire à la planchette (figure 8).

Figure 1.9. Relevé d'ombres en cours



#### **Utilisation**

Placer la planchette sur une surface horizontale, en orientant le petit côté nord-sud (le gnomon côté sud).

Noter à intervalle régulier (toutes les heures ou toutes les demi-heures) la position de l'extrémité de l'ombre. Renouveler l'opération à différentes dates dans l'année (par exemple autour des solstices et équinoxes) en veillant à bien orienter la planchette de la même manière à chaque fois.

## Durée de la journée

Il est facile de s'apercevoir que les journées sont plus courtes en automne et en hiver qu'au printemps et en été.

Pour être plus précis, on peut mesurer la longueur de la journée à différentes époques de l'année. On peut aussi la calculer en utilisant des éphémérides donnant les heures de lever et de coucher du Soleil.

#### Données

On peut trouver les heures de lever et de coucher du Soleil pour Paris sur un calendrier des Postes. Si on veut avoir les horaires pour une autre ville, le site de l'IMCCE vous les fournira (imcce.fr, demander éphémérides, lever coucher et passage au méridien, choisir Soleil, les dates, le lieu, demander le

calcul). L'heure de lever et de coucher du Soleil est donnée en temps universel, il faut donc ajouter 1 h (en heure d'hiver) ou 2 h (en heure d'été) pour avoir l'heure de la montre.

#### Exploitation des données

La durée de la journée peut se calculer facilement en collège. Pour des élèves plus jeunes, on peut simplement noter sur un graphique du type de la figure 9 l'heure du lever et l'heure du coucher. La durée de la journée est immédiatement visualisée par le segment joignant les deux points.

Figure 1.10. Heures de lever et couchers du soleil

Durée de la journée au cours de l'année

Date	1/01	1/02	1/03	1/04	1/05	1/06	1/07	1/08	1/09	1/10	1/11	1/12
Lever du Soleil												
Coucher du Soleil												

	0 1	6	12	18	24
1/01	سيلسيبلسيبلسي	يسلينسيلينسلينسلينسلي			ليتسلينسلينسك
	0 1	6	12	18	24
1/02	سيلسيبلسيبلسي				ليتسلينسيليسيل
	0 1	6	12	18	24
1/03	luuduuduuduu				ليستلينسلينسك

Extrait d'un graphique à compléter avec les heures de lever et de coucher du Soleil.

On visualise ainsi sans calcul la longueur de la journée (d'après un document Espé Dijon).

Graphique à télécharger

## **Températures**

Un relevé de température peut être fait au cours de l'année.

Il est aussi très intéressant de s'intéresser aux températures dans d'autres lieux, en particulier dans l'hémisphère sud. Cela permettra de se poser des questions si certains affirment que la Terre est plus proche du Soleil en juillet.

**Tableau 1.1. Température moyenne à Paris (France)** 

Mois	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept.	octobre	nov.	déc.
T (°C)	5,2	7,3	10,8	15,2	19	22,4	24,2	23,9	20,7	14,8	9,7	6

Tableau 1.2. Température moyenne à Melbourne (Australie)

	Mois	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septem	boct.	nov.	déc.
[	T (°C)	21	21,3	19,5	16,4	13,7	11,4	10,7	11,8	13,5	15,4	17	19,3

## Étoile polaire

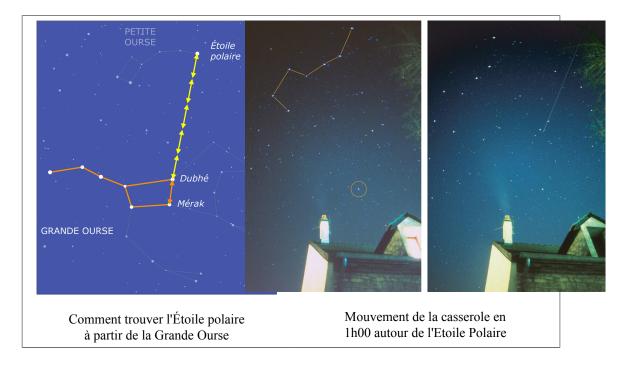
Ce type d'observation est plus difficile puisqu'elle a lieu de nuit mais on peut demander aux élèves de la faire depuis chez eux.

On apprend tout d'abord à reconnaître la « casserole » (une partie de la Grande Ourse) et à trouver, à partir d'elle, l'Étoile polaire.

Si ensuite on observe toujours depuis le même point, on remarque que la Grande Ourse change de position au cours de la nuit (en une heure, on voit bien le déplacement) et au cours de l'année (en observant par exemple à un mois d'intervalle à la même heure).

Par contre, la Polaire est immobile.

Figure 1.11. L'Étoile polaire et la la Grande Ourse



## Chapitre 2. 2. Comprendre

## A. Des modèles

### Le modèle géocentrique

Les saisons peuvent très bien s'expliquer en gardant la Terre immobile au centre du monde dans ce qu'on appelle un modèle géocentrique, présenté par exemple par Ptolémée dans son Almageste au II<sup>e</sup> siècle de notre ère et qui a perduré pendant 14 siècles jusqu'à Copernic.

Il ne semble pas opportun de le présenter aux élèves mais si, dans les méandres d'une démarche d'investigation, un modèle de ce type est proposé, il faut savoir qu'il n'est pas facile à rejeter.

On peut même affirmer qu'il est tout aussi juste que le modèle simplifié de Copernic. Un mouvement n'a de sens que dans un repère. Dans le repère terrestre, l'ensemble de la voûte céleste tourne autour de la Terre en un jour et le Soleil se déplace à la surface de cette sphère en un an. C'est le modèle de Ptolémée présenté dans la figure ci-dessous.

Mais les physiciens préfèrent certains repères à d'autres. Il est beaucoup plus facile d'expliquer le monde en considérant que la Terre se déplace en tournant sur elle-même et autour du Soleil.

Pour Ptolémée, des milliers d'étoiles tournent autour de la Terre en un jour. Pour Copernic, il suffit de faire tourner la Terre sur elle-même en un jour.

Copernic et un peu plus tard Galilée n'avaient d'ailleurs pas de preuve, ils avaient juste montré que les mouvements de la Terre pouvaient expliquer les observations, leur principal argument étant celui de la simplicité.

À propos de la rotation de la Terre sur elle-même :

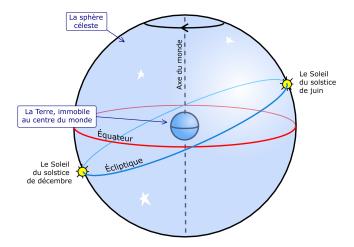
« Qui voudrait croire que la nature (tous s'accorde à penser qu'elle ne met pas en œuvre beaucoup de moyens quand elle peut se contenter de peu) ait choisi de mouvoir à une vitesse inconcevable un nombre immense de très grands corps pour produire un résultat auquel suffirait le mouvement modéré d'un seul corps tournant autour de son propre centre ? » (Galilée, Dialogue sur les deux grands systèmes du monde)

On peut apporter maintenant d'autres arguments. Par exemple, pour que les étoiles fassent le tour de la Terre en 24 heures, elles devraient aller plus vite que la lumière, ce qui pose de gros problèmes aux physiciens.

Et, à propos de la révolution des planètes autour du Soleil :

« Et au milieu de tous, repose le Soleil. En effet, dans ce temple splendide, qui donc poserait ce luminaire en un lieu autre, ou meilleur, que celui d'où il peut éclairer tout à la fois ? » (Copernic, des révolutions des orbes célestes).

Figure 2.1. Modèle de Ptolémée



On peut préciser que quelques savants grecs avaient déjà proposé de faire se mouvoir la Terre.

Héraclide du Pont, au IV<sup>e</sup> siècle avant notre ère, pensait que la Terre tournait sur elle-même.

Un siècle plus tard, Aristarque de Samos y ajoutait le mouvement des planètes autour du Soleil.

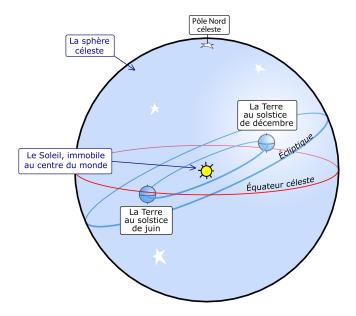
Mais ces théories restèrent minoritaires. Il est toujours difficile d'admettre que la Terre se déplace alors qu'elle nous semble immobile sous nos pieds.

## Le modèle héliocentrique

La Terre tourne sur elle-même en un jour tout en parcourant une orbite circulaire autour du Soleil en un an. Ce modèle héliocentrique simplifié permet d'expliquer l'essentiel des observations.

Kepler a montré que l'orbite de la Terre n'est pas tout à fait un cercle mais une ellipse et qu'elle est parcourue à vitesse variable. Ceci permet d'expliquer par exemple que les saisons n'ont pas toutes la même durée mais il est tout à fait inutile de parler d'orbite elliptique pour expliquer le phénomène des saisons.

Figure 2.2. Le système héliocentrique

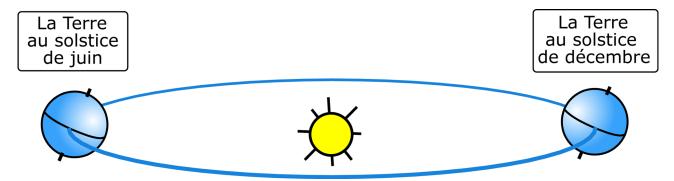


On a ici volontairement dessiné l'axe de la Terre vertical. Dans ce cas, c'est l'orbite de la Terre qui est inclinée. Dans l'espace, il n'y a ni haut ni bas et le fait de représenter l'orbite de la Terre horizontale avec son axe incliné n'est qu'une habitude (figure 13).

Depuis la Terre, on voit le Soleil sur l'écliptique, grand cercle de la sphère céleste. En fait, la sphère céleste n'existe pas puisque les étoiles sont toutes à des distances différentes du Soleil mais c'est une notion bien pratique. Il faudrait la représenter beaucoup plus grande tellement les étoiles sont éloignées ou alors dessiner une orbite de la Terre minuscule.

Le pôle Nord céleste est dans le prolongement de l'axe de la Terre. On y trouve l'Étoile polaire.

Figure 2.3. Orbite terrestre



L'orbite terrestre représentée de manière plus habituelle dans un plan horizontal. Dans cette représentation, l'axe de la Terre n'est pas vertical.

#### Quelques abus de langage

On entend parfois (ou on lit): « l'axe de la Terre n'est pas vertical » ou « l'axe de la Terre est incliné », ce qui, en soi, n'a pas de sens.

Sur Terre, une verticale passe par le centre de notre planète. Dans ce sens, l'axe de la Terre est vertical.

Dans l'espace, il n'y a ni haut ni bas. On ne peut donc pas dire que l'axe de la Terre est incliné. Et pourtant, les globes terrestres ont presque tous un axe incliné. Ce que l'on devrait dire, c'est que, si on

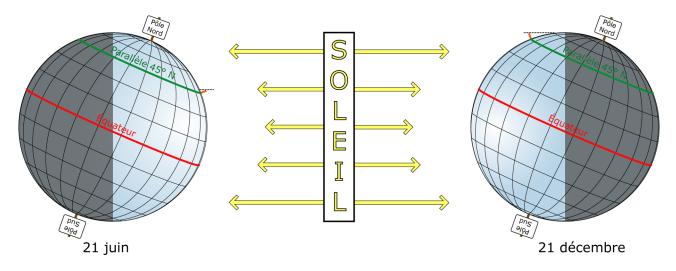
représente l'orbite de la Terre dans un plan horizontal, alors, dans cette représentation, l'axe de la Terre est incliné (ou n'est pas vertical). Ce qui peut rendre les explications un peu lourdes. Il vaut mieux préciser, quand on parle d'inclinaison d'axe de la Terre, que c'est par rapport au plan de son orbite.

## Comprendre les observations

Nous allons reprendre les observations une par une pour voir comment elles s'expliquent dans ce modèle héliocentrique simplifié.

#### La hauteur du Soleil à midi

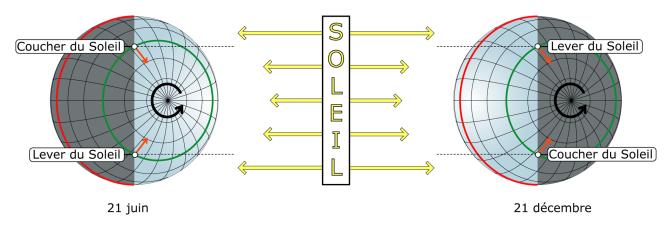
Figure 2.4. Hauteur du soleil à midi



On a placé un bâton vertical orange à midi à la latitude de 45° nord au solstice d'été à gauche et au solstice d'hiver à droite. L'ombre de ce bâton est beaucoup plus courte à gauche le 21 juin que le 21 décembre à droite donc le Soleil est plus haut.

#### La direction du lever du Soleil

Figure 2.5. La direction du lever du Soleil



On peut vérifier que le 21 juin, à 45° de latitude nord, le Soleil se lève au nord-est et se couche au nord-ouest alors que le 21 décembre, il se lève au sud-est pour se coucher au sud-ouest.

## La durée de la journée

Figure 2.6. La durée de la journée, vue 1

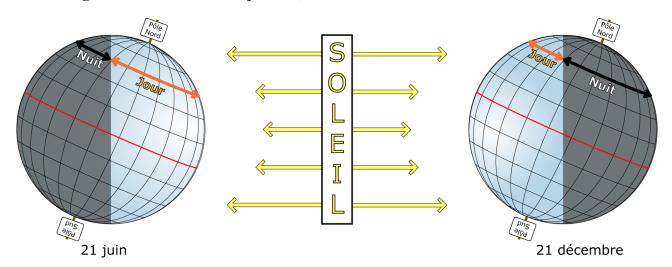
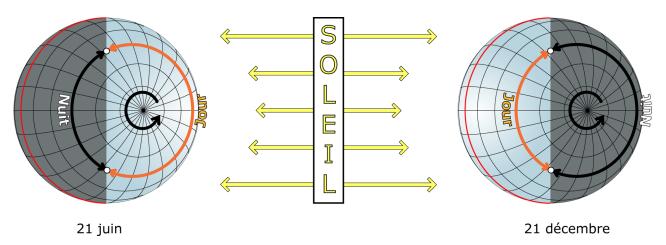
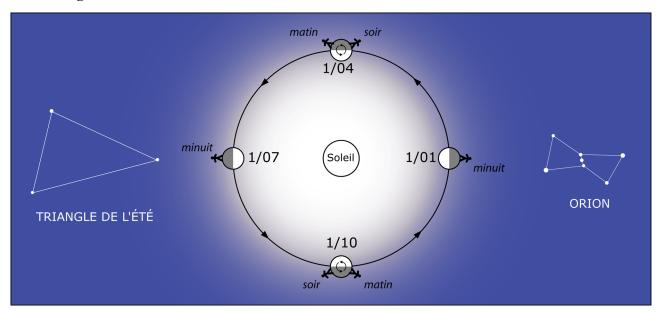


Figure 2.7. La durée de la journée, vue 2



#### Le ciel de nuit

Figure 2.8. Le ciel de nuit



## B. Des activités pour comprendre

Il est plus intéressant avec des élèves de faire découvrir par des activités comment on peut expliquer les observations.

Une des premières questions qui se pose est : « Pourquoi fait-il plus chaud en été ? ».

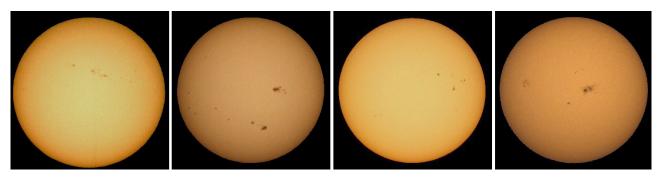
Et une des premières réponses que l'on obtient habituellement est : « Parce que l'on est plus près du Soleil en été ». Pour l'analyser, il est utile de commencer par une première activité sur le sujet.

### La distance du Soleil

La première question que l'on peut poser est : « Peut-on savoir si l'on est plus près du Soleil à certains moment sans avoir besoin de mesurer sa distance ? »

La réponse n'est très compliquée : Plus on est proche d'un objet, plus il paraît gros. On a donc photographié le Soleil à différentes époques de l'année avec le même appareillage. Si l'on est plus près du Soleil en été, il devrait apparaître plus gros sur la photo.

Figure 2.9. Photos du soleil les 13 janvier, 25 avril, 22 juin, 23 septembre



Le diamètre du Soleil sur chacune des images change peu. On trouve même que le Soleil semble un peu plus petit sur l'image du 22 juin. On serait donc un peu plus éloigné du Soleil à ce moment-là. La distance du Soleil n'a donc rien à voir avec les saisons.

On peut aussi utiliser les tableaux de température pour l'hémisphère nord et l'hémisphère sud (voir 1<sup>ère</sup> partie). On remarque qu'en juillet, les températures sont maximales à Paris et minimales à Melbourne. La Terre, qui est minuscule comparée à sa distance au Soleil, ne peut être à la fois plus proche et plus éloignée du Soleil en juillet.

Figure 2.10. Soleil-Terre à l'échelle

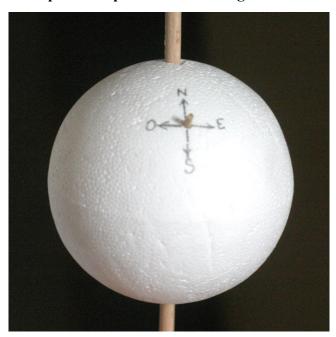


L'orbite de la Terre n'est pas exactement un cercle centré sur le Soleil. C'est ce qu'on appelle une ellipse dont le Soleil est un foyer. La Terre passe au plus près du Soleil (au périhélie) aux alentours du 4 janvier, à 147 100 000 km et au plus loin (à l'aphélie) début juillet, à 152 100 000 km. Le fait que la Terre soit plus proche du Soleil en janvier ne fait que légèrement modifier les saisons en adoucissant les hivers de l'hémisphère nord mais, comme nous l'avons vu au chapitre précédent et comme nous le verrons dans les activités qui suivent, c'est bien l'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport au plan de son orbite qui est à l'origine des saisons.

#### Recherche d'un modèle

#### Matériel pour comprendre

Figure 2.11. Matériel pour comprendre: Terre et gnomon



- Une boule en polystyrène d'environ 10 cm de diamètre représentant la Terre.
- Un axe pour la Terre (pic à brochette par exemple).
- Un gnomon placé à environ 45° de latitude nord (cure-dent épointé).
- Une lampe de poche. .
- Les points cardinaux sont indiqués sur la boule en polystyrène à l'emplacement du gnomon

#### Utilisation

On cherche déjà comment placer la lampe de poche et la boule en polystyrène pour qu'il soit midi au Soleil (l'ombre du gnomon doit être au nord).

On cherche ensuite comment faire varier la hauteur du Soleil à midi donc la longueur de l'ombre.

#### **Commentaires**

Les deux solutions qui paraissent les plus simples sont :

- faire basculer l'axe de la Terre ;
- faire monter ou descendre le Soleil.

La première solution pose problème si on a remarqué que l'axe de la Terre vise toujours l'Étoile polaire.

La deuxième solution demande à faire se déplacer un astre énorme, 300 000 fois plus massif que la Terre ; il y a peut-être plus simple.

Beaucoup savent que la Terre tourne autour du Soleil. On peut essayer de la faire tourner autour du Soleil dans un plan horizontal en gardant son axe vertical. Dans ce cas, la longueur de l'ombre du gnomon à midi ne change pas.

Par contre, si on incline cet axe et que celui-ci garde toujours la même direction dans l'espace, on voit la longueur de l'ombre varier quand on fait tourner la Terre autour du Soleil.

Cette solution est la plus simple si on veut que le Soleil reste fixe et que la direction de l'axe de la Terre reste fixe elle aussi.

### Activités avec un globe

### Types de globes

Figure 2.12. Gnomon et points cardinaux fixés sur un globe du commerce.



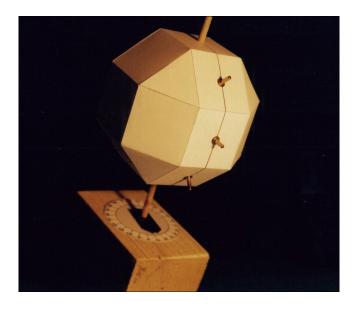
La plupart des globes ont un axe déjà incliné de 23° par rapport à la verticale.

On peut trouver des globes dont l'axe a une inclinaison variable, ce qui permet de tester différentes hypothèses.

Il faudra positionner sur ce globe à une latitude d'environ 45° nord un horizon avec ses points cardinaux et un gnomon.

La plupart des globes possèdent un arceau qui peut être gênant : quand on fait tourner la Terre, le gnomon peut ne pas passer sous l'arceau. Le mieux est un globe avec un axe mais sans arceau.

Figure 2.13. Globe à 26 faces.

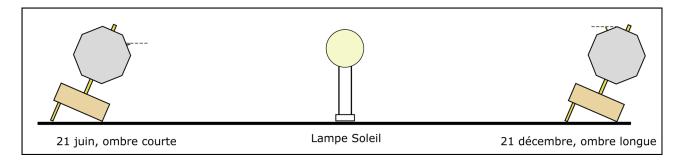


On peut aussi se fabriquer soi-même son globe (figure 22). Trois gnomons ont été installés : un premier à une latitude de 45° nord, un deuxième à l'équateur et un dernier pour l'hémisphère sud (45° S).

Le socle peut être adapté pour que l'axe puisse être soit vertical soit incliné de 23° en ajoutant une cale.

#### Hauteur du Soleil à midi

Figure 2.14. Hauteur du Soleil à midi



### Durée de la journée

Avec un globe, on peut vérifier que la durée de la journée est nettement supérieure à 12 heures autour du 21 juin pour une latitude de 45° nord et nettement inférieure à 12 heures le 21 décembre. Pour des mesures plus précises, on peut utiliser un index gradué en heures comme on le voit sur la figure 22.

Figure 2.15. Direction du lever et du coucher



Au solstice d'hiver, le Soleil se lève au sud-est (l'ombre est au nord-ouest)

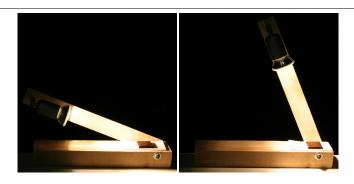
## Température et hauteur du Soleil

Deux phénomènes permettent d'expliquer pourquoi il fait plus chaud en été.

Le premier est la variation de la durée de la journée. Il est facile de comprendre que si le Soleil nous éclaire plus longtemps, il nous chauffe aussi plus longtemps.

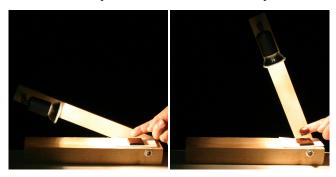
Le deuxième est la variation de hauteur du Soleil. Celui-ci chauffe davantage le sol s'il est haut dans le ciel que s'il est bas. Ceci est par contre plus difficile à appréhender. Les figures qui suivent donnent plusieurs manières de l'expliquer.

Figure 2.16. Modélisation de l'éclairement de la terre



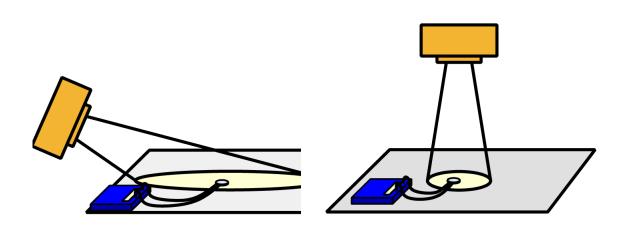
Deux lampes identiques sont placées chacune sur un bras articulé, l'une à 20° de hauteur (position du Soleil à midi au solstice d'hiver) et l'autre à 67° de hauteur (position du Soleil à midi au solstice d'été).

Deux carrés de chocolat sont placés au niveau de l'axe, ils sont donc situés à la même distance de l'ampoule. On allume les deux lampes en même temps.



Après quelques minutes, on appuie avec un doigt sur chacun des carrés de chocolat. Celui qui correspond au soleil d'hiver est resté sec alors que celui situé sous le soleil d'été est fondu (par contre, la tranche du chocolat d'hiver risque d'avoir fondu).

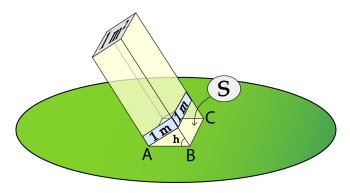
Figure 2.17. Modélisation de l'éclairement : mesure avec un luxmètre



Avec une lampe de poche, on éclaire une feuille de papier blanc en éclairage rasant

Avec la lampe de poche, on éclaire une feuille de papier blanc en éclairage rasant verticalement, en essayant de se maintenir à la même distance du centre de la feuille. La surface éclairée est beaucoup plus importante dans le premier cas, on aura donc moins de chaleur apportée par unité de surface. On peut aussi faire les mesures à l'aide d'un luxmètre.

Figure 2.18. Calcul de l'énergie arrivant au sol



On imagine un faisceau de lumière en provenance du Soleil et arrivant au sol de 1 m<sup>2</sup> de section. Il transporte 1370 W (on ne tient pas compte de l'absorption atmosphérique).

On calcule qu'il doit chauffer une surface S égale à  $1/\sin h$  (h étant la hauteur du Soleil). L'énergie E reçue par  $m^2$  de sol horizontal est égale à 1370/S soit  $1370\times\sin h$ . Ce qui donne, à une latitude moyenne de  $47^\circ$ :

• le 21 décembre : h = 20, E = 460 W

• le 21 juin :  $h = 66^{\circ}$ , E = 1250 W (2.7 fois plus)

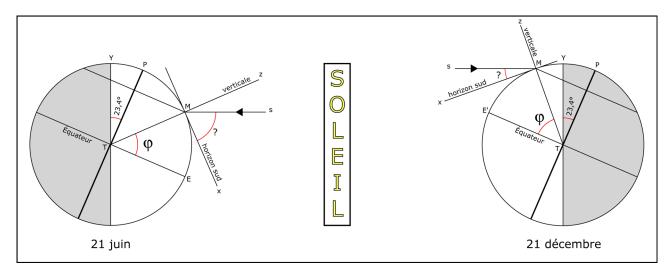
#### **Autres calculs**

(ces calculs sont adaptés de "Mathématiques & Astronomie", des fiches pédagogiques du Comité de Liaison Enseignants et Astronomes disponible sur clea-astro.eu [http://www.clea-astro.eu]).

#### Calcul de la hauteur du Soleil à midi aux solstices

(pour un lieu situé au nord du tropique du Cancer)

Figure 2.19. Calcul de la hauteur du Soleil à midi aux solstices à une latitude  $\phi$ 



M est l'observateur, P est le pôle Nord, s indique la direction du centre du Soleil. Les figures sont faites dans le plan du méridien de M à midi solaire avec  $\varphi$ > 23,4°

On peut commencer par tracer les parallèles à [Ty), [TP) et [TE) passant par M.

On trouve pour la hauteur du Soleil à midi

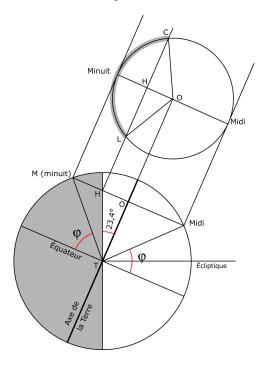
• au solstice d'hiver :  $90^{\circ}$  -  $\varphi$  -  $23,4^{\circ}$ 

• au solstice d'été :  $90^{\circ}$  -  $\phi$  +  $23,4^{\circ}$ 

### Calcul de la durée de la journée aux solstices

Ce calcul est un peu plus délicat, une des difficultés étant la compréhension de la figure.

Figure 2.20. Calcul de la durée de la journée aux solstices à la latitude φ



Sur la Figure 2.20, l'image du bas est identique à celle de la figure Figure 2.19. Il s'agit d'une vue de la Terre "de face" (vue dans le plan de son orbite) au solstice d'été.

L'image du haut est une vue "de haut" prise au-dessus du pôle Nord. L'arc grisé va du point C (Coucher du Soleil) au point L (Lever) en passant par minuit. Il correspond donc à la nuit, l'autre partie du cercle (de L à C en passant par midi) correspondant au jour.

La Terre tournant sur elle-même à vitesse constante, la durée de la nuit est proportionnelle à l'angle saillant COL et la durée de la journée à l'angle rentrant LOC.

La Terre effectue un tour sur elle-même en 24 h. On néglige le fait que, pendant ce temps, elle se déplace autour du Soleil.

En prenant 1 pour rayon de la Terre, on pourra calculer OM, OT, OH puis l'angle saillant COL.

On trouve r cosφ, r sinφ, r sinφ tan 23,4°

puis  $2 \times \cos^{-1}(\tan \varphi \tan 23.4^{\circ})$ .

Il ne reste plus qu'à calculer la longueur de la nuit et celle de la journée, sachant que 360° correspondent à 24 h.

Pour une latitude de 49°, on obtient 8 h de nuit et 16 h de jour.

## Conclusion

Les différences de température entre les saisons proviennent des variations de hauteur du Soleil et de durée de la journée. Ces deux paramètres ont une importance à peu près égale. Ils proviennent tous les deux de l'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport au plan de son orbite.

Aux latitudes de l'Europe, le Soleil apporte une énergie maximale au sol le 21 juin. Pourtant, ce n'est en général pas le jour le plus chaud de l'année car il y a une certaine inertie, il faut un certain temps à la terre pour se réchauffer.

## Chapitre 3. 3. Compléments

## Solstices et équinoxes

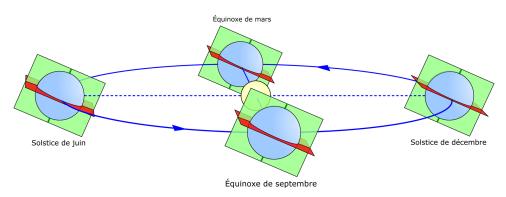
Dans la première partie, on a défini solstices et équinoxes au jour près. Mais on peut les définir comme des instants précis :

- l'équinoxe est l'instant où le Soleil est dans le plan de l'équateur ;
- le solstice de juin est le moment où le Soleil est le plus au nord du plan de l'équateur ;
- le solstice de décembre est le moment où le Soleil est le plus au sud du plan de l'équateur.

Si on considère le plan contenant l'axe de la Terre et perpendiculaire au plan de l'écliptique :

- ce plan passe par le Soleil aux solstices ;
- ce plan est perpendiculaire à la direction Soleil-Terre aux équinoxes.

Figure 3.1. Orbite de la Terre : solstices et équinoxes



Aux équinoxes, la ligne Terre-Soleil est contenue dans le plan de l'équateur.

Aux solstices, la ligne Terre-Soleil est contenue dans le plan vert.

### L'orbite de la Terre

Nous avons considéré jusqu'à présent que l'orbite de la Terre était circulaire et parcourue à vitesse constante, son axe gardant une direction fixe dans l'espace. Ce modèle simplifié est suffisant pour comprendre le phénomène des saisons dans son ensemble mais, si on veut être précis, il faut apporter quelques corrections.

On sait depuis Kepler que les planètes parcourent des orbites elliptiques dont le Soleil est un des foyers. Leur vitesse est maximale quand la planète est au périhélie (le point de l'orbite le plus près du Soleil) et minimale à l'aphélie (le point le plus éloigné).

Pour la Terre, le passage au périhélie a lieu début janvier à une distance de 147 100 000 km. Le passage à l'aphélie a lieu début juillet, à 152 100 000 km. La distance moyenne est de 149 600 000 km.

Entre le périhélie et l'aphélie, la variation de distance est de 3 % et la variation d'énergie reçue par l'ensemble de la Terre, de 7 %.

Équinoxe de printemps (20 mars) Périhélie (2 janvier) Solstice Solstice d'hiver (21 déc) d'été (21 juin) Soleil Aphélie (5 juillet) Eté Équinoxe d'automne (22 septembre)

Figure 3.2. L'orbite de la Terre représentée comme une ellipse fortement exagérée.

Les saisons sont indiquées pour l'hémisphère nord

#### Dans l'hémisphère nord:

- Le solstice d'été a lieu quand la Terre est presque au plus loin du Soleil donc les étés sont moins chauds qu'ils ne seraient si la Terre restait toujours à la distance moyenne du Soleil.
- Le solstice d'hiver a lieu quand la Terre est presque au plus près du Soleil donc les hivers sont moins froids qu'ils ne seraient si la Terre restait à la distance moyenne du Soleil.
- Les saisons de l'hémisphère nord sont tempérées par le fait que le solstice d'hiver a lieu à proximité du périhélie.

#### Dans l'hémisphère sud, c'est l'inverse :

- En janvier, c'est l'été et la Terre est au plus près du Soleil.
- En juillet, c'est l'hiver et la Terre est au plus loin du Soleil.
- Les différences entre les saisons sont accentuées par le fait que le solstice d'été a lieu à proximité du périhélie.

Nous n'avons parlé ici que des facteurs astronomiques du climat. Pour être complet, il faudrait tenir compte de la plus grande surface occupée par les océans dans l'hémisphère sud (ce qui tempère les différences été-hiver), des courants marins...

Autre conséquence des lois de Kepler, les quatre saisons n'ont pas toutes la même durée. La figure 31 montre que l'ellipse n'est pas coupée en quatre parties égales par les solstices et les équinoxes. La partie

de l'orbite parcourue par la Terre du 21 décembre au 20 mars est un peu plus courte que les autres. De plus, la vitesse de la Terre est plus importante au périhélie (30,3km/s contre 29,3 à l'aphélie). Ces deux phénomènes font que l'hiver est plus court que l'été.

• Hiver: 89j

• Printemps: 92j 18h

• Été: 93j 16h

• Automne: 89j 20h

## La précession des équinoxes

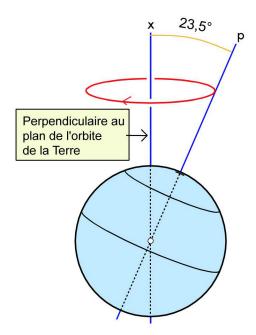
L'axe de la Terre ne garde pas une direction fixe dans l'espace mais il décrit un cône en 26 000 ans. Quelles en sont les conséquences ?

- 1. L'axe de la Terre pointe actuellement à proximité d'une étoile brillance de la Petite Ourse mais ce ne fut pas toujours le cas. Il y a 4 000 ans, c'était Thuban, une étoile du Dragon, qui servait d'étoile polaire. Il y a 2 000 ans, il n'y avait pas d'étoile brillante (de magnitude inférieure à 4) à moins de 8° du pôle Nord céleste.
- 2. Les saisons sont liées à l'orientation de l'axe de la Terre. Si cet axe se déplace (même sans changer d'inclinaison), les saisons vont se décaler par rapport aux étoiles. La précession des équinoxes signifie que la position de la Terre sur son orbite au moment des équinoxes se déplace : elle avance d'environ 1,4° par siècle.

Conséquence : l'année des saisons de 365,242 jours (à laquelle est lié notre calendrier) est plus courte que la période sidérale de révolution de la Terre de 365,256 jours mesurée par rapport aux étoiles.

3. Les signes du zodiaque définis il y a 2 000 ans correspondaient approximativement aux constellations du même nom. Ces signes étant fixes dans le calendrier, ils se sont décalés par rapport aux étoiles. Le signe du Cancer par exemple correspond dans le ciel à la constellation des Gémeaux actuellement.

Figure 3.3. La précession des équinoxes



# Les variations des paramètres de l'orbite terrestre

Trois paramètres variables de l'orbite terrestre modifient les saisons et le climat :

- 1. L'obliquité de l'orbite terrestre : c'est l'angle entre l'axe de la Terre et la perpendiculaire au plan de son orbite. Elle oscille entre 22 et 24,5° avec une période de 21 000 ans et vaut 23,5° actuellement.
- 2. La longitude du périhélie : dans le plan de l'orbite terrestre, c'est l'angle entre l'axe Soleil-Périhélie de la Terre avec la droite qui joint le soleil au point gamma de l'orbite terrestre (lieu du l'équinoxe de printemps d'hémisphère nord). Actuellement, la Terre passe au périhélie début janvier, au début de l'hiver, ce qui correspond à une longitude du pérhélie de 270°. Mais la précession déplace les positions des solstices et les équinoxes sur la trajectoire de la Terre. De plus, le grand axe de l'ellipse (la ligne périhélie aphélie de la figure 31) se déplace aussi. Ces deux phénomènes font que périhélie et équinoxe de printemps se retrouvent tous les 21 500 ans seulement au même endroit ce qui correspond à une longitude du périhélie de 0°.
- 3. L'excentricité de l'orbite terrestre indique le degré d'aplatissement de l'ellipse. Elle varie de 0 (cercle parfait) à 0,07 et vaut actuellement 0,0167.

Milankovitch a étudié les variations de ces trois paramètres et les a reliées aux périodes de glaciation.

## Des maquettes pour comprendre les saisons

Figure 3.4. Les saisons présentées par les élèves du collège de Limas (69)

