



LA CAPSULE DU DÉBUTANT



Les étoiles

- ✓ La structure de la matière (partie 1)
- ✓ La structure de la matière (partie 2)
- ✓ L'énergie des étoiles
- ✓ **L'anatomie des étoiles**



LES OBJECTIFS

- ★ Au terme de cette présentation, le participant pourra :
 - Expliquer la stratification en couches de la structure interne des étoiles.
 - Démontrer la dynamique de la diffusion de l'énergie au sein des différentes zones des étoiles.
 - Raconter les relations entre l'activité stellaire et les éléments structurels visibles à sa surface.
 - Décrire les influences de l'étoile au sein de son environnement spatial.



DÉFINITIONS

★ L'anatomie est la discipline qui a pour objet :

Composante morphologique

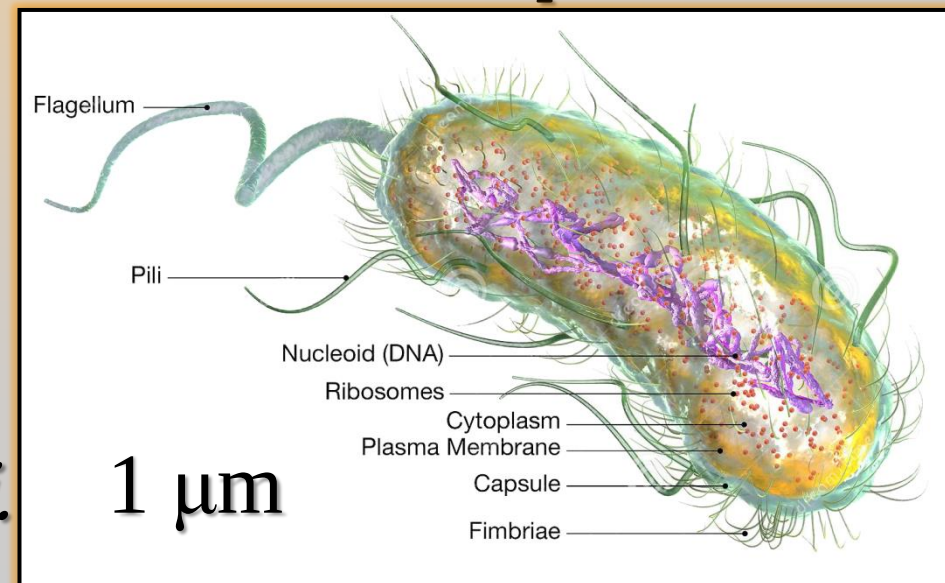
1. L'étude de la forme et de la structure des êtres organisés,
2. et celle des rapports des organes qui les constituent.

Composante morpho-physiologique



DÉFINITIONS

- ★ Bien qu'il nous reste beaucoup à connaître sur la structure et la dynamique des étoiles, il faut admettre que les étoiles sont des êtres relativement simples.
- ★ Beaucoup plus simples que la toute petite bactérie *Escherichia coli*.





ÉTATS ET DÉFINITIONS

★ Qu'est-ce qu'une étoile ?

➤ Une étoile est un astre suffisamment massif pour briller par lui-même.

★ Au sein de notre Univers, les étoiles ont-elles toujours existé ?

➤ Non. Comme nous le verrons, les étoiles “ naissent, vivent et meurent ”.



ÉTATS ET DÉFINITIONS

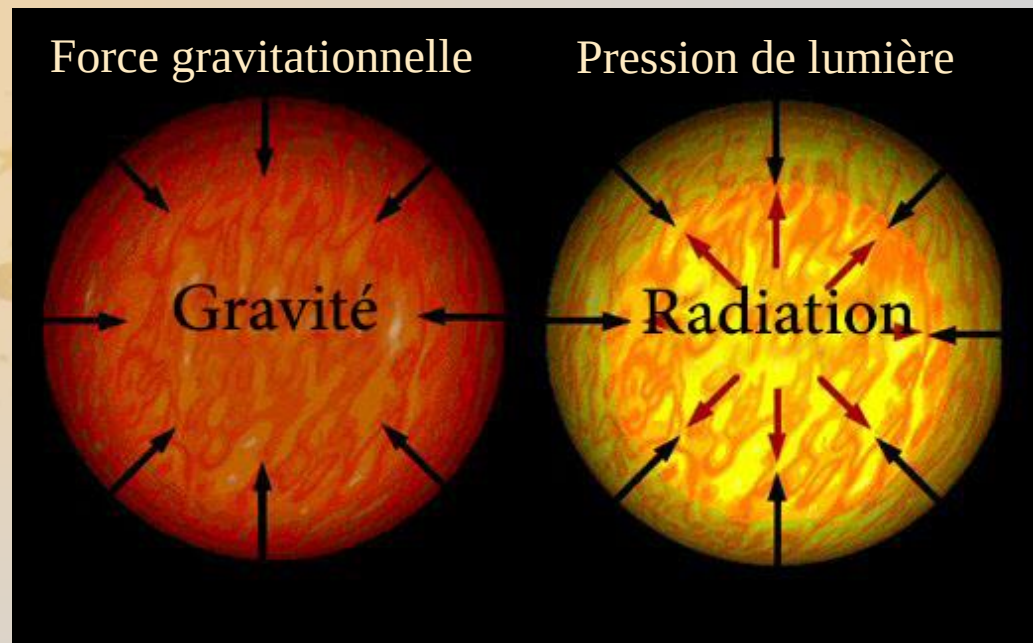
- ★ Les étoiles sont-elles toujours les mêmes ?
 - Non, les étoiles changent avec le temps...
 - Mais elles passent la majorité de leur existence dans un état relativement stable qu'on appelle la *séquence principale*.
 - Au cours de cette période, elles brillent par l'énergie émise lors de la fusion de l'hydrogène (${}^1_1\text{H}$) en hélium (${}^4_2\text{He}$).
- ★ Sur la séquence principale, les étoiles sont dans un état d' *équilibre hydrostatique*.



ÉTATS ET DÉFINITIONS

★ Une étoile n'est autre chose qu'une immense marmite sphérique chauffée de

l'intérieur où la gravitation agit comme un couvercle, maintenant l'intégrité de l'astre en état d'équilibre hydrostatique.

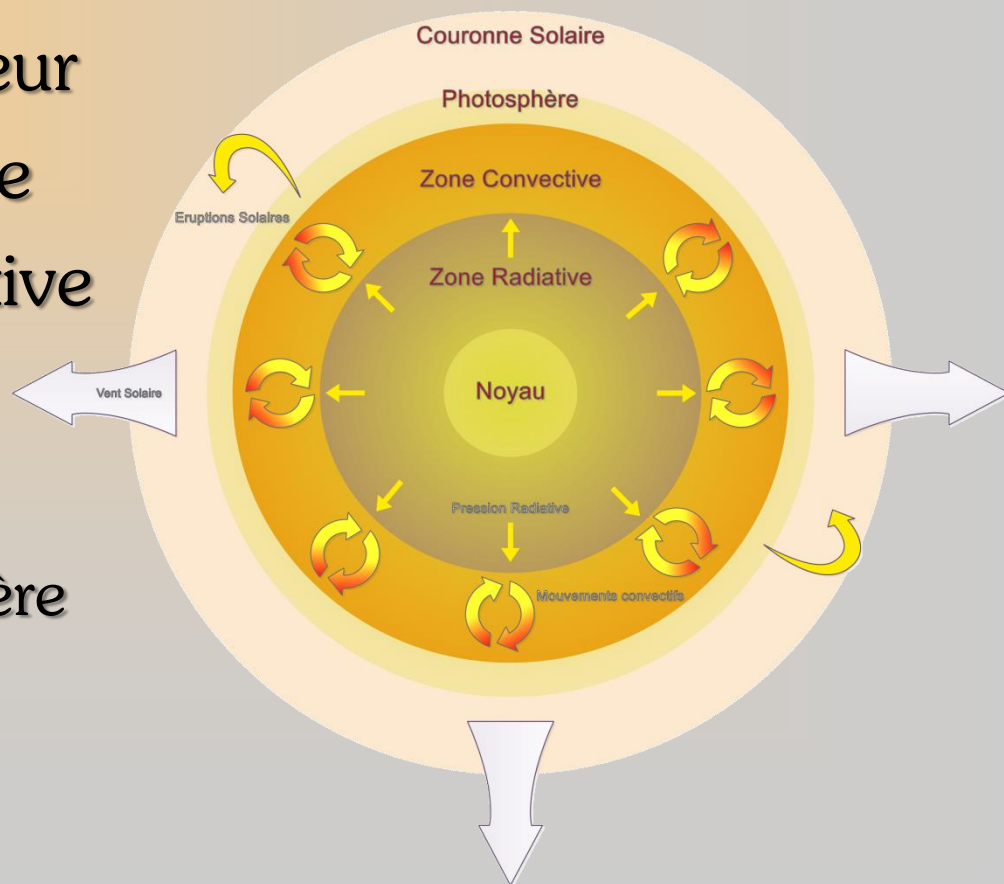




L'ANATOMIE INTERNE GLOBALE

★ La structure des étoiles et les noms :

- Noyau ou cœur
- Zone radiative
- Zone convective
- Photosphère
- Atmosphère
 - Chromosphère
 - Couronne
 - Héliosphère

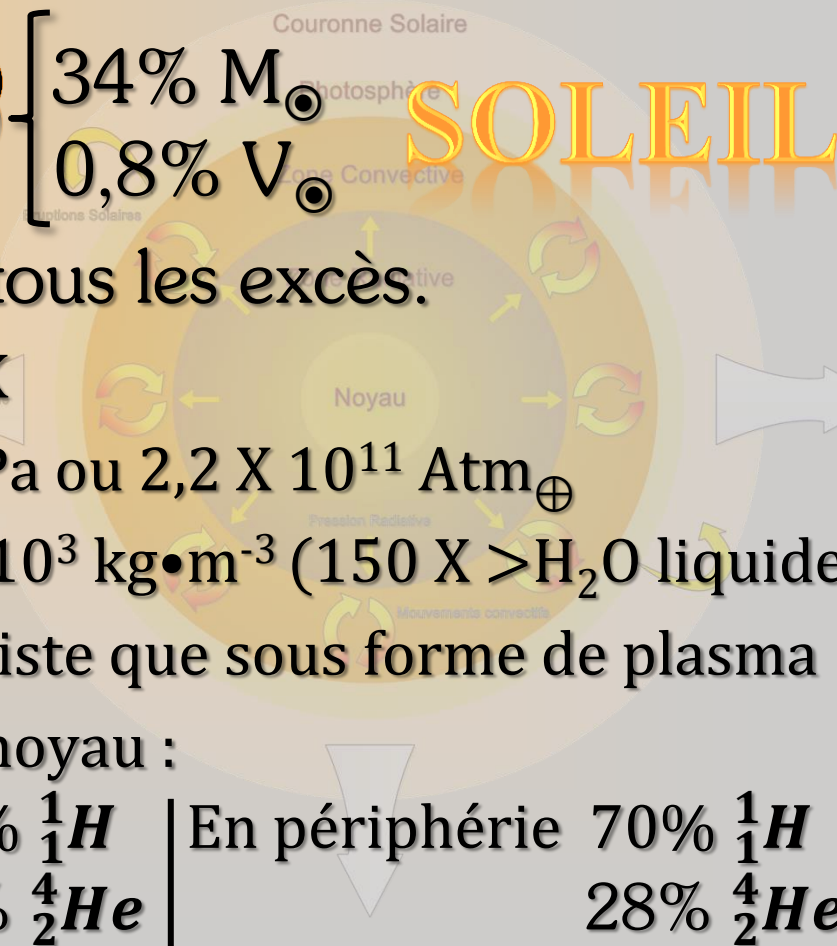




L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

- ★ Le Noyau ($\frac{1}{4} R_{\odot}$)
- 34% $M_{\odot}$
 - 0,8% $V_{\odot}$
- C'est le cœur de tous les excès.
- $T^{\circ} \cong 15,7 \times 10^6 \text{ K}$
 - $P \cong 2,65 \times 10^{16} \text{ Pa}$ ou $2,2 \times 10^{11} \text{ Atm}_{\oplus}$
 - Densité $\cong 150 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ($150 \times > \text{H}_2\text{O}$ liquide)
 - La matière n'y existe que sous forme de plasma
 - Composition du noyau :

Au centre	$33\% \frac{1}{1}\text{H}$	En périphérie	$70\% \frac{1}{1}\text{H}$
	$65\% \frac{4}{2}\text{He}$		$28\% \frac{4}{2}\text{He}$





L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ Le Noyau ($\frac{1}{4} R_{\odot}$) $\left\{ \begin{array}{l} 34\% M_{\odot} \\ 0,8\% V_{\odot} \end{array} \right.$ **SOLEIL**

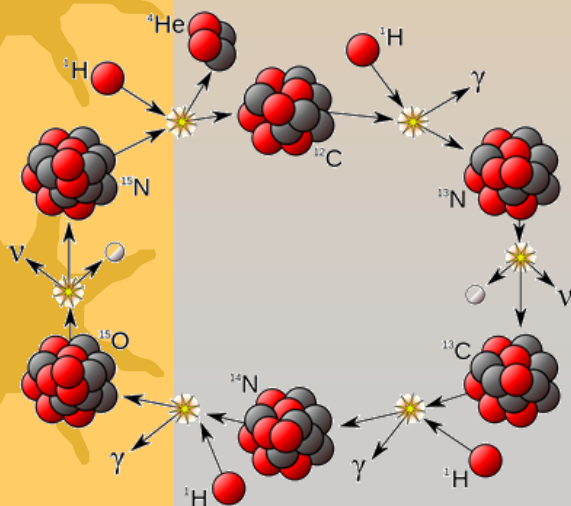
➤ C'est l'animateur du Système solaire.

■ Fournit 99% de l'énergie ➔ Fusion nucléaire



Chaîne proton-proton (77%)

Chaîne CNO (23%)



Couronne Solaire

Photosphère

Zone Convective

Rayons Solaires

Zone Radiative

Centre du Soleil

Pression

Température

Densité

Composition Chimique

Composition Nucléaire

Composition Élémentaire

Composition Moléculaire

Composition Ionique

Composition Atomique



L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ Le Noyau ($\frac{1}{4} R_{\odot}$) $\left\{ \begin{array}{l} 34\% M_{\odot} \\ 0,8\% V_{\odot} \end{array} \right.$ **SOLEIL**

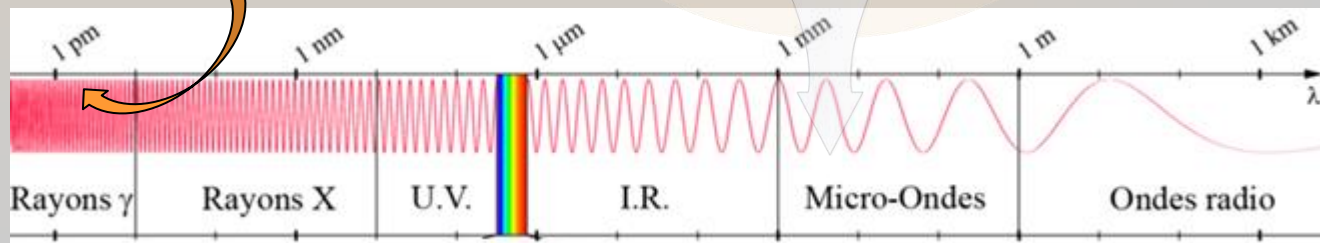
➤ C'est l'animateur du Système solaire

■ Fournit 99% de l'énergie ➔ Fusion nucléaire



■ Cette énergie est émise sous forme de photons γ

$$E = h\nu$$





L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ Le Noyau ($\frac{1}{4} R_{\odot}$) $\left\{ \begin{array}{l} 34\% M_{\odot} \\ 0,8\% V_{\odot} \end{array} \right.$

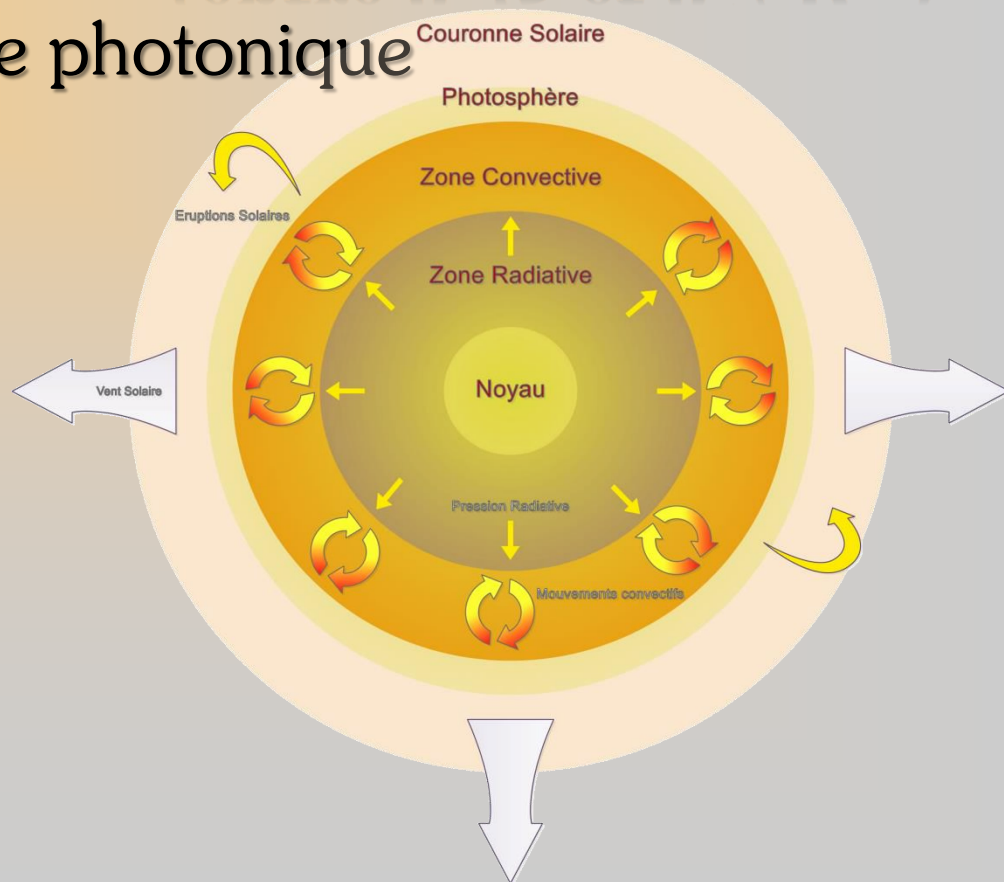
- Chaque seconde, le Soleil fusionne 626 million de tonnes de $\frac{1}{1}H$ en 621,7 million de tonnes $\frac{4}{2}He$.
- La perte de masse de 4,3 tonnes par seconde génère une puissance de $L_{\odot} = 3,86 \times 10^{26} \text{ W (J}\cdot\text{s}^{-1})$.
- Un 0,000 000 032 % ($3,2 \times 10^{-8}\%$) de l'énergie solaire est absorbé par la Terre, soit $1\,367 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ de surface...
- ... de quoi maintenir allumées 13 ampoules de 100 W pour chaque mètre carré de surface !





L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

- ★ La Zone radiative (entre $0,25$ et $0,7 R_{\odot}$)
 - C'est l'entrave photonique





L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

- ★ La Zone radiative (entre $0,25$ et $0,7 R_{\odot}$)
 - C'est l'entrave photonique
 - T° passe de $8 \times 10^6 \text{ K} \rightarrow 2 \times 10^6 \text{ K}$.
 - Composition : un plasma dense passant de totalement à partiellement ionisé.
 - La matière évolue vers l'état atomique.
 - L'ionisation partielle rend la diffusion de l'énergie de plus en plus opaque aux photons.
 - Les photons sont absorbés et réémis sans cesse.

SOLEIL

Couronne Solaire
Photosphère
Zone Convective
Eruptions Solaires
Zone Radiative
Noyau
Vent Solaire

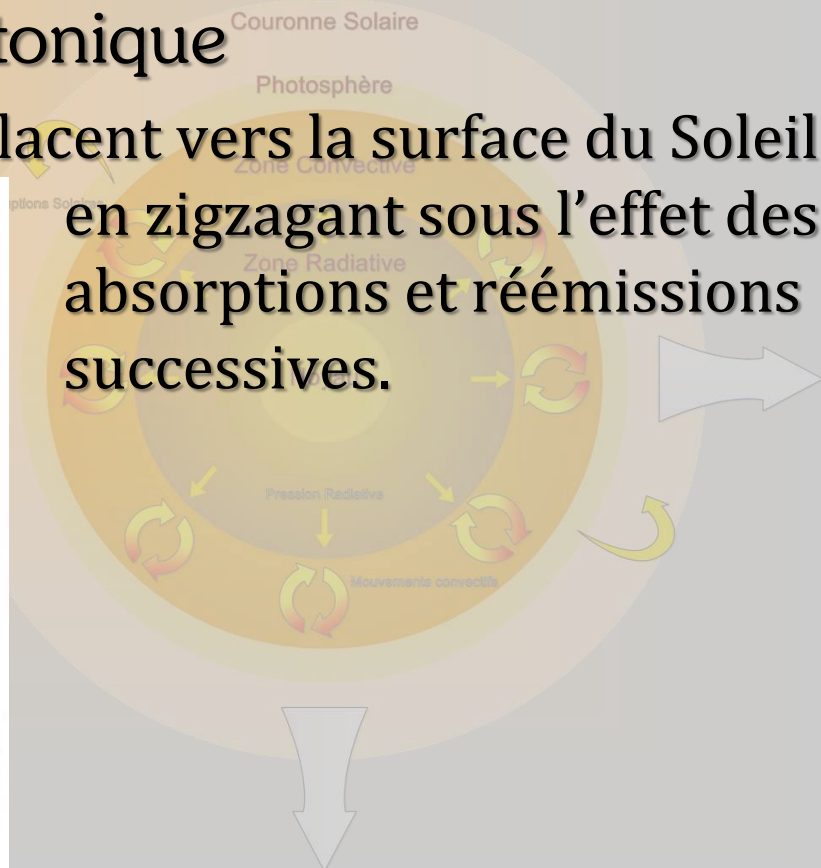
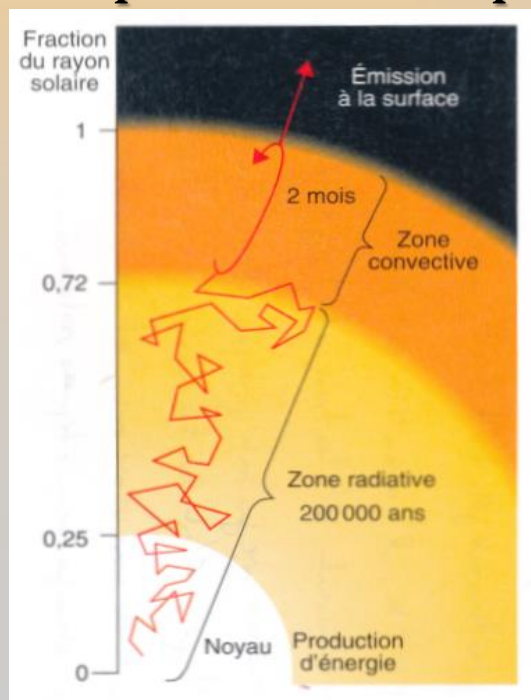


L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Zone radiative (entre 0,25 et 0,7 R_☉)

➤ C'est l'entrave photonique

- Les photons se déplacent vers la surface du Soleil en zigzagant sous l'effet des absorptions et réémissions successives.



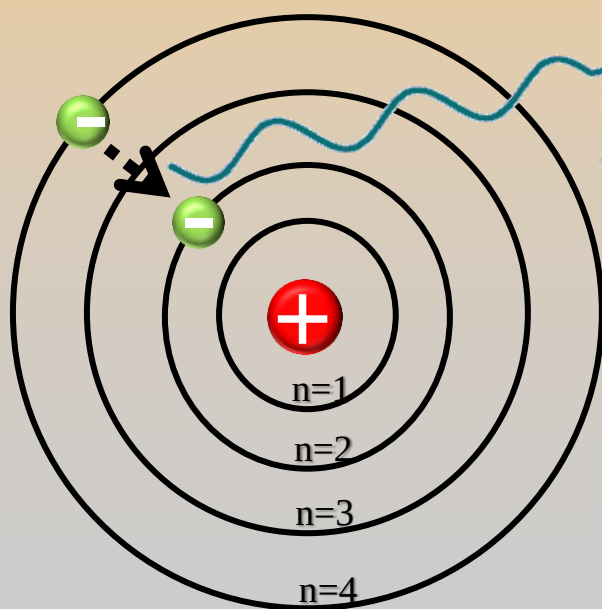


L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

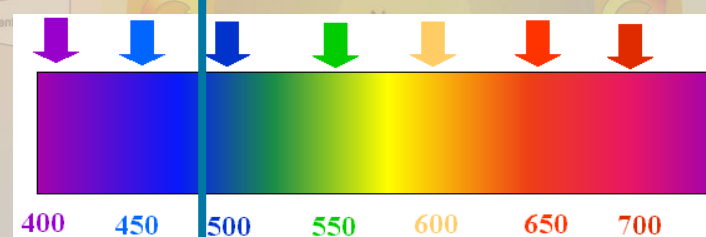
★ La Zone radiative (entre $0,25$ et $0,7 R_{\odot}$)

➤ C'est l'entrave photonique

■ Ce faisant, les photons γ sont thermalisés.



photon



486 nm

Couronne Solaire
Photosphère
Zone Convective
Zone Radiative
Eruptions Solaires
Ventre

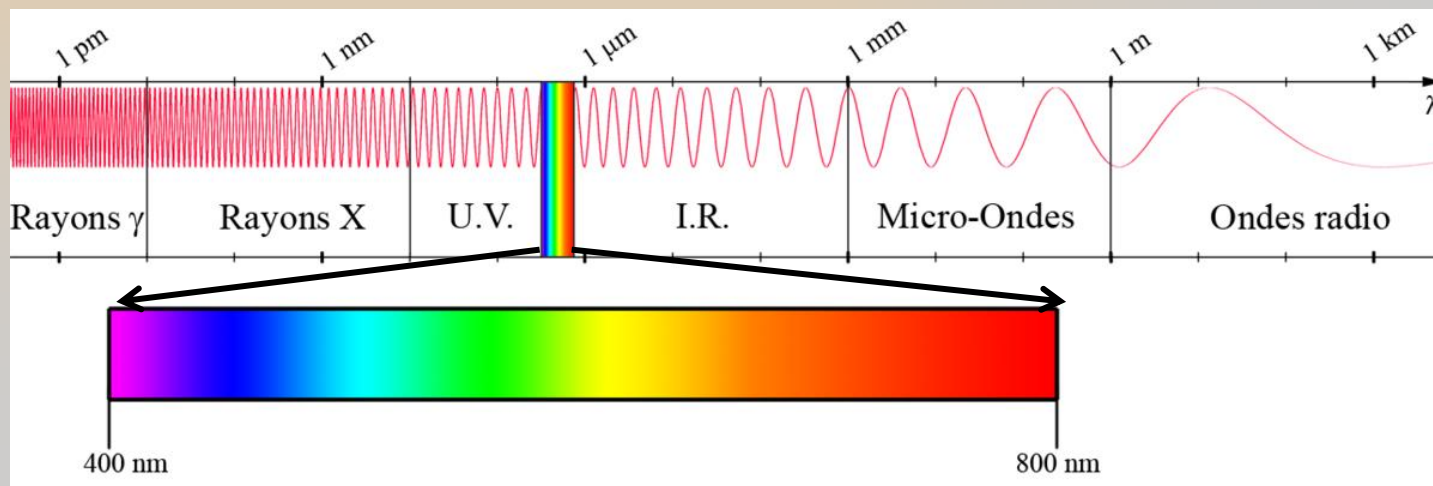


L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Zone radiative (entre $0,25$ et $0,7 R_{\odot}$)

➤ C'est l'entrave photonique

- Ce faisant, les photons γ sont **thermalisés**.
- Les photons finissent par occuper toutes les niches du spectre électromagnétique.





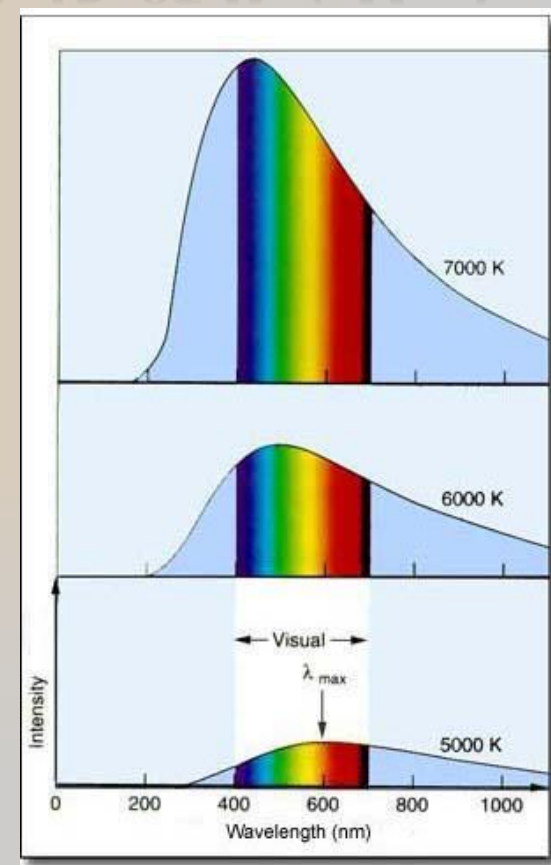
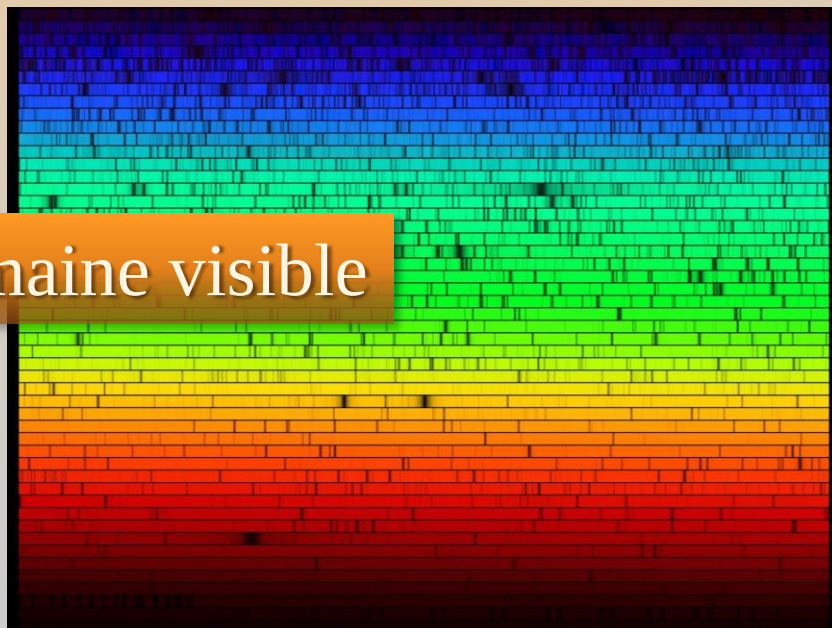
L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Zone radiative (entre $0,25$ et $0,7 R_{\odot}$)

➤ C'est l'entrave photonique

- Ainsi, le spectre du Soleil est celui d'un **corps noir**.

Dans le domaine visible





L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

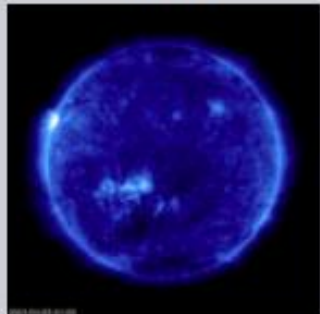
★ La Zone radiative (entre $0,25$ et $0,7 R_{\odot}$)

➤ C'est l'entrave photonique

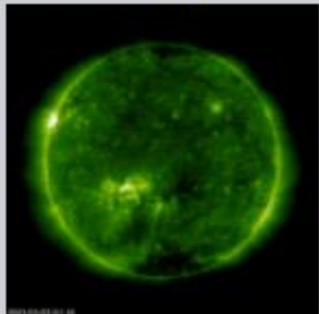
- Ainsi, le spectre du Soleil est celui d'un **corps noir**.

Dans un spectre étendu de λ

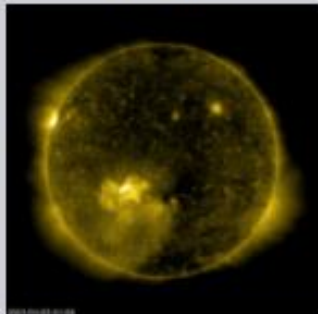
EIT 171



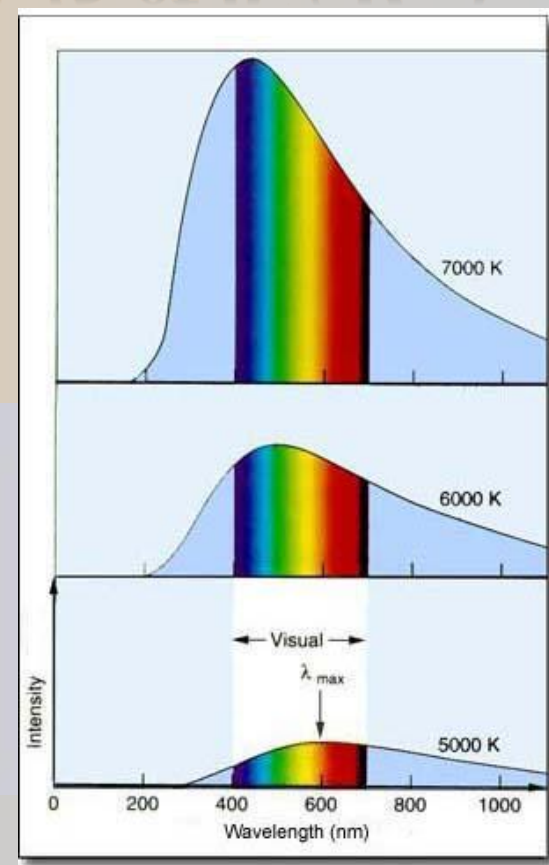
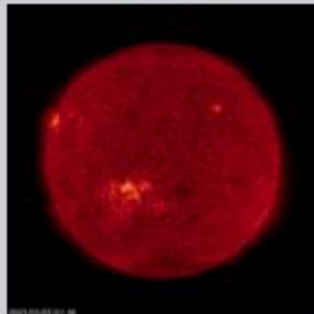
EIT 195



EIT 284



EIT 304



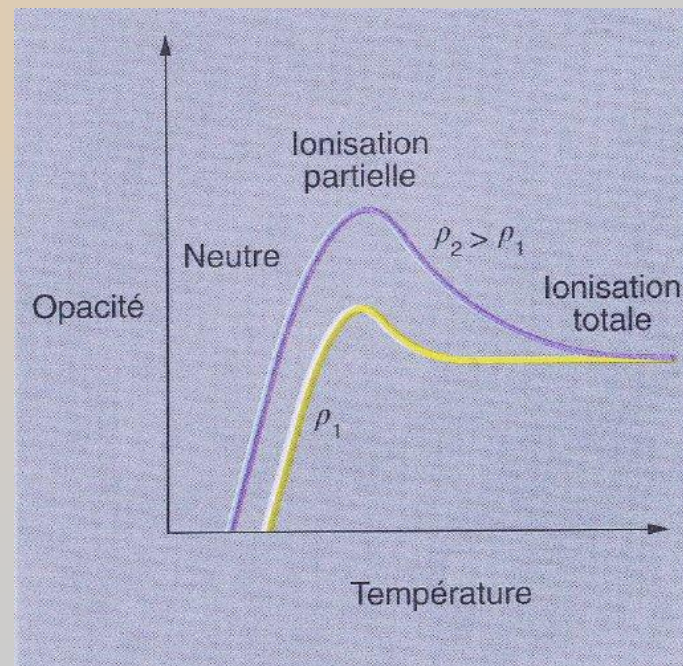


L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Zone radiative (entre 0,25 et 0,7 $R_{\odot}$)

➤ C'est l'entrave photonique

- En approchant de la frontière de la zone, la $\rho T \downarrow$ et les électrons commencent à se combiner aux protons, formant des atomes.
- L'ionisation devient partielle et la matière est de plus en plus opaque aux photons...
- ... qui ralentissent et s'embourbent !



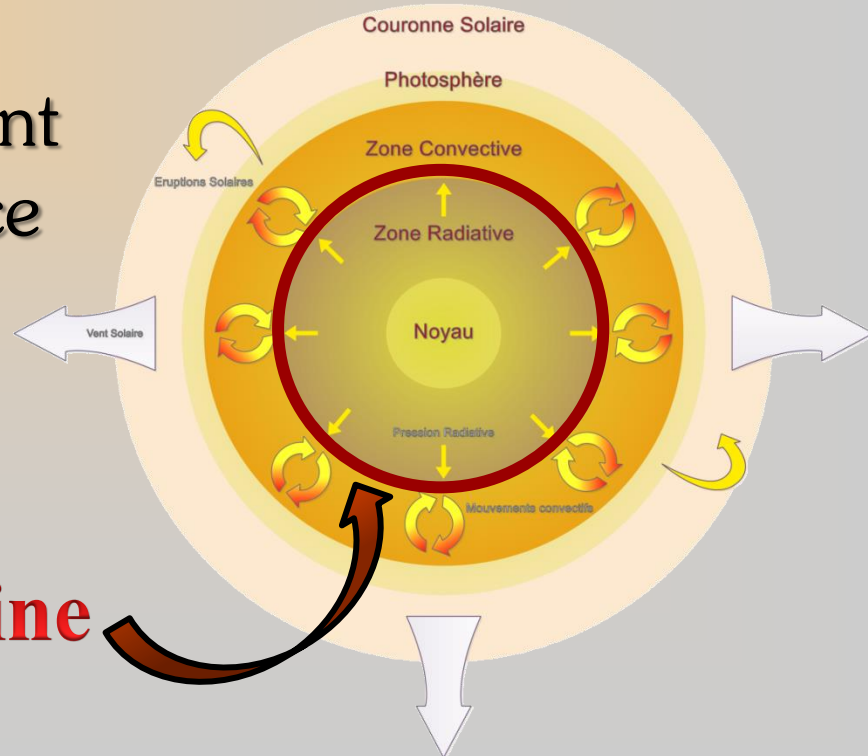


L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Tachocline ($0,7 R_{\odot}$)

SOLEIL

- Anneau de 3 000 km de diamètre.
- L'embouteillage photonique devient extrême et menace l'exutoire énergétique de l'étoile.



Tachocline



L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Tachocline ($0,7 R_{\odot}$)

SOLEIL

➤ Les mouvements ioniques engendrent la dynamo solaire.

- Activent le réseau magnétique du Soleil





L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Tachocline (0,7 R_☉)

SOLEIL

➤ Change le mode de transmission de l'énergie.

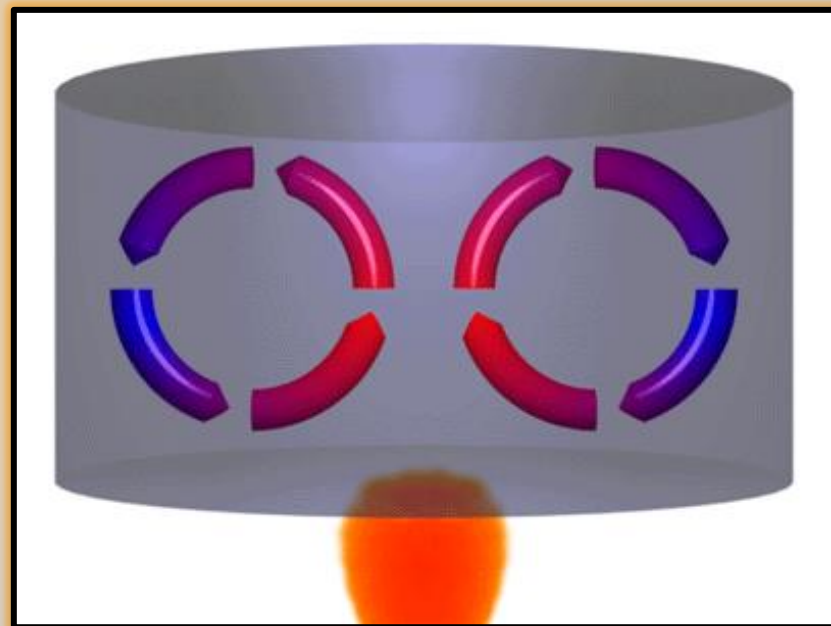
- D'un processus radiatif, l'énergie va désormais être transportée par des *courants de convection* qui vont se former.
- Ces courants de dispersion de l'énergie se constituent spontanément dans les *fluides* soumis à un déséquilibre thermique.



L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE



★ La Tachocline





L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE



★ La Tachocline



Terre : courants de convection

- ✓ Atmosphère
- ✓ Manteau



L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Zone convective (0,8 à 1 R_☉)

➤ Voie rapide pour le transport de l'énergie

- Elle compte pour 2% de la masse du Soleil.
- La T° y passe de 2 000 000 K ➡ 5 800 K.
- La densité passe de 0,15 gr•cm⁻³ à 2 X 10⁻⁷ gr•cm⁻³, soit 1/10 000 la densité de l'air qu'on retrouve au niveau de la mer sur Terre.

Un avion ne pourrait voler
dans l'atmosphère du
Soleil





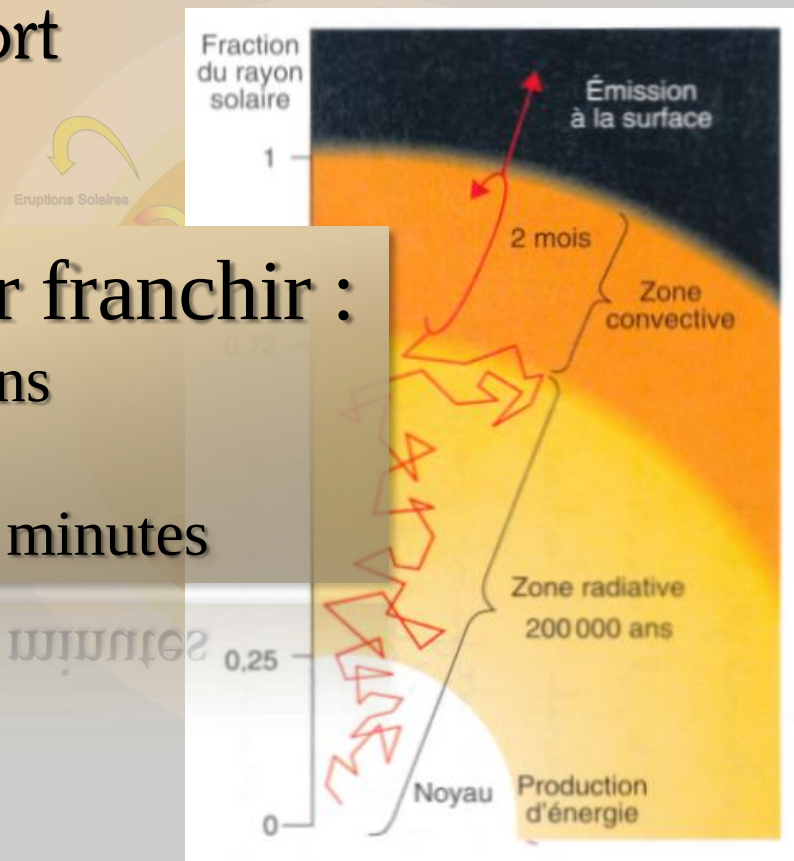
L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Zone convective (0,8 à 1 R_☉)

- Accélère le transport de l'énergie

Temps requis au photon pour franchir :

- Zone radiative ➡ entre 10⁴ et 10⁶ ans
- Zone convective ➡ 60 jours
- De la Photosphère à la Terre ➡ 8,3 minutes

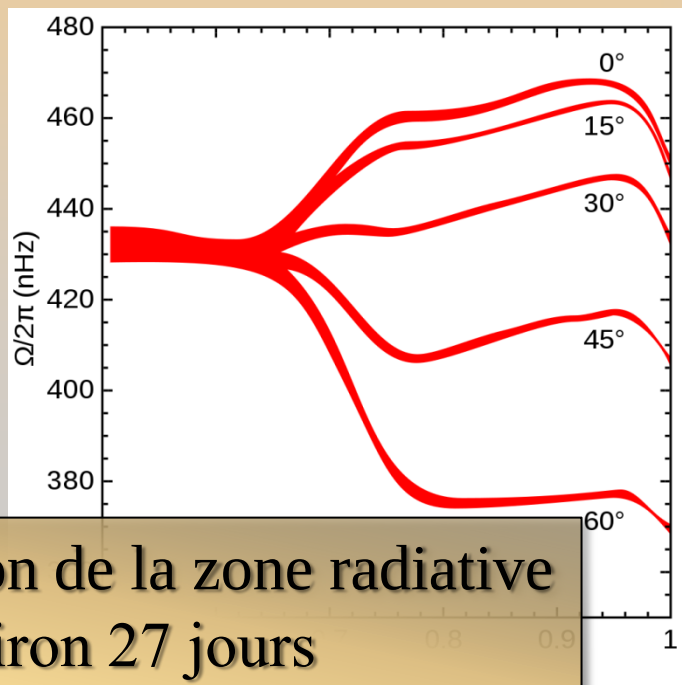




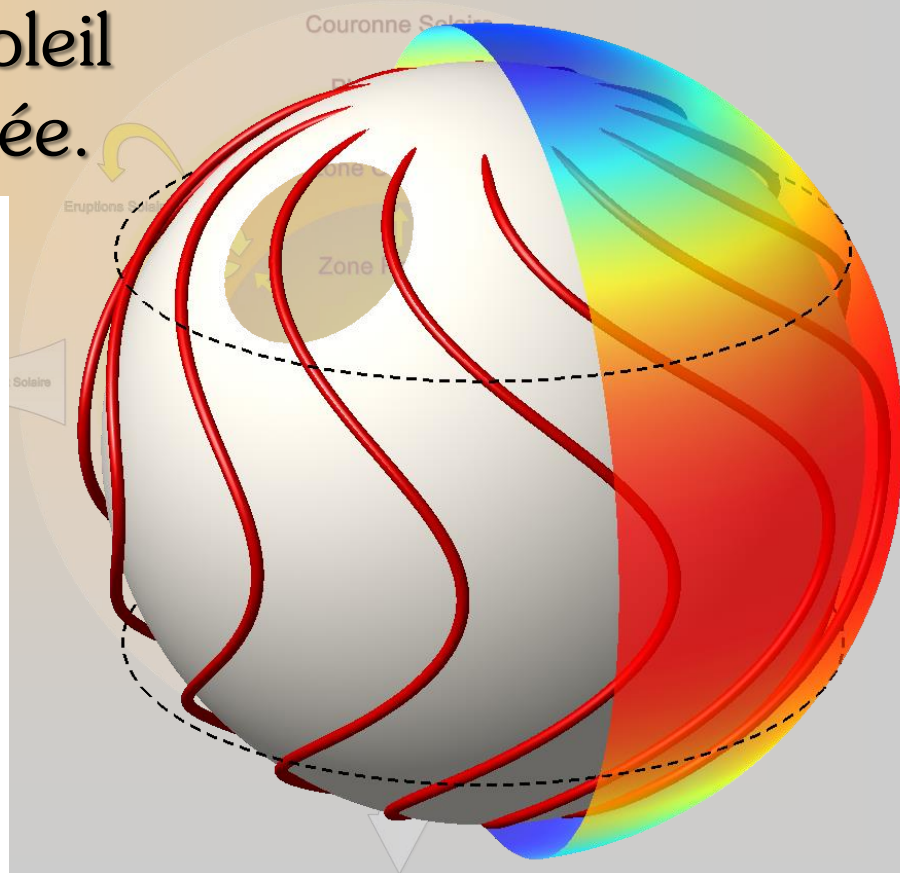
L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Zone convective (0,8 à 1 $R_{\odot}$)

➤ La rotation du Soleil devient différenciée.



La rotation de la zone radiative est d'environ 27 jours



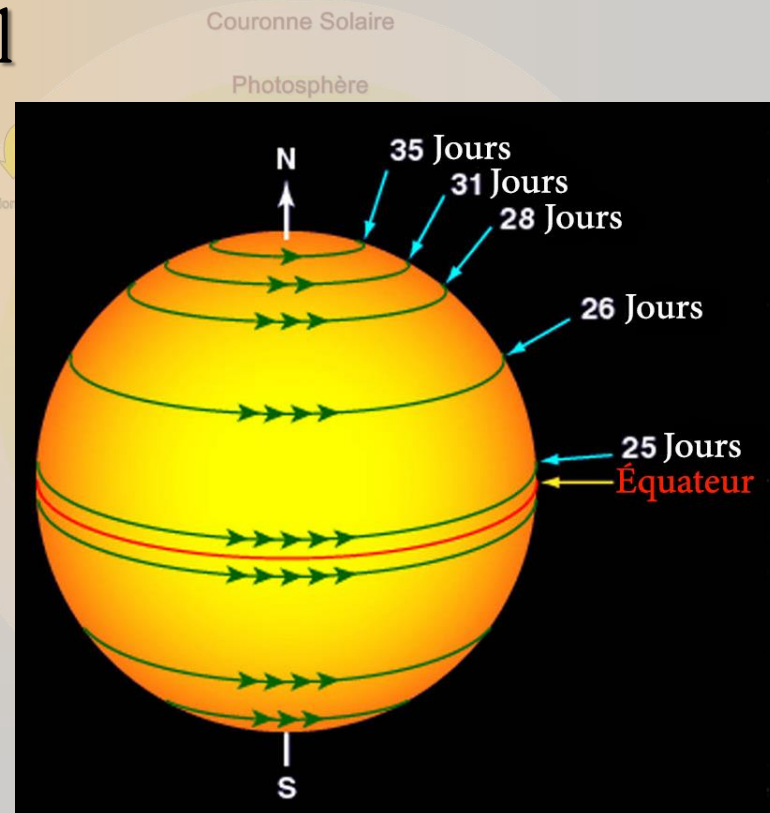
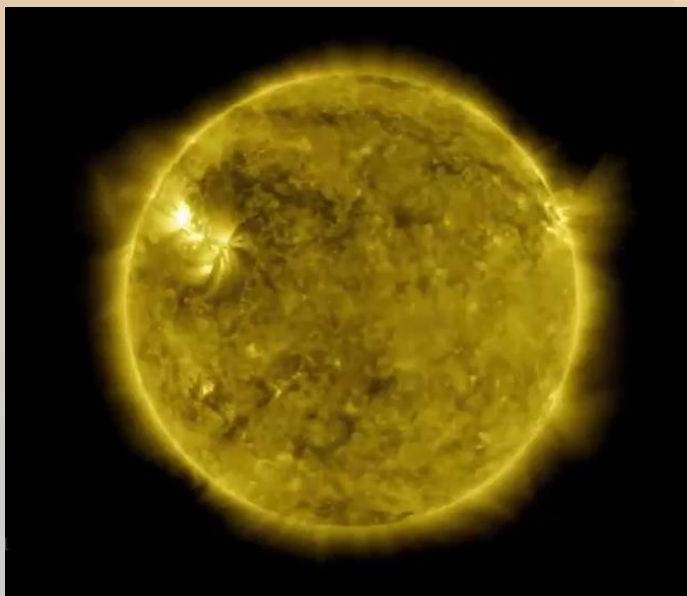


L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Zone convective (0,8 à 1 $R_{\odot}$)

➤ La rotation du Soleil devient différenciée.

■ Selon la latitude

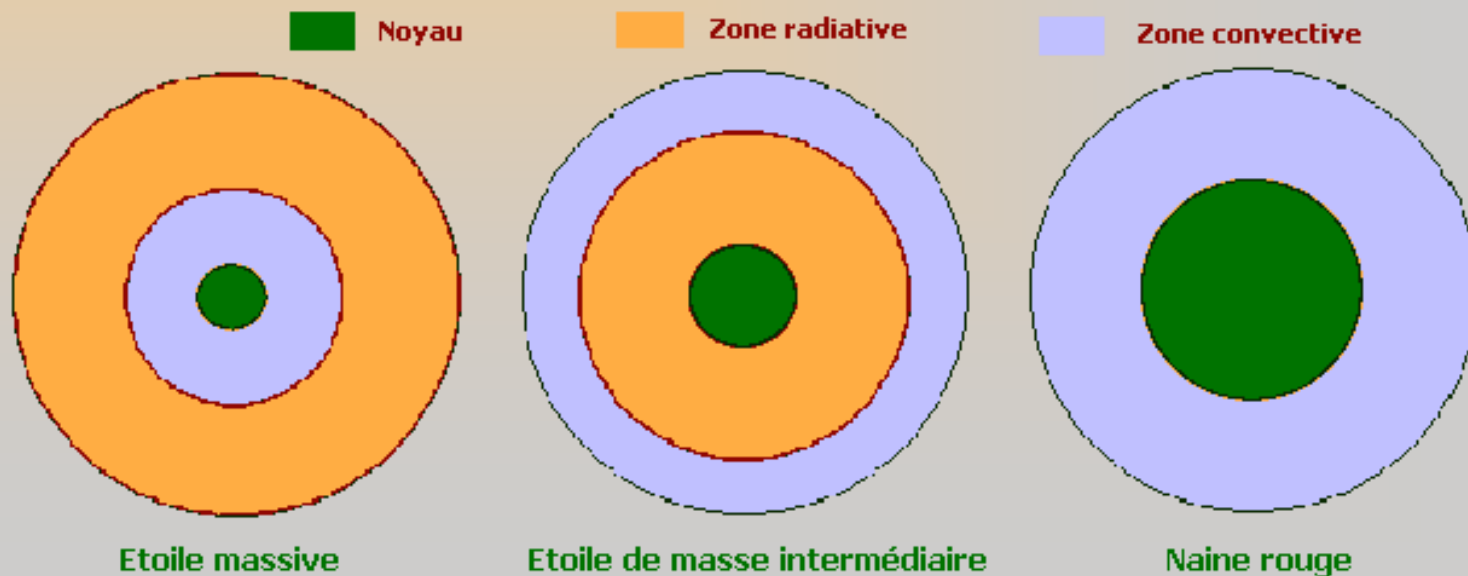




L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ Zone radiative / Zone convective

- Les volumes relatifs de la zone de radiation versus la zone de convection varient avec la *masse* de l'étoile sur la séquence principale.

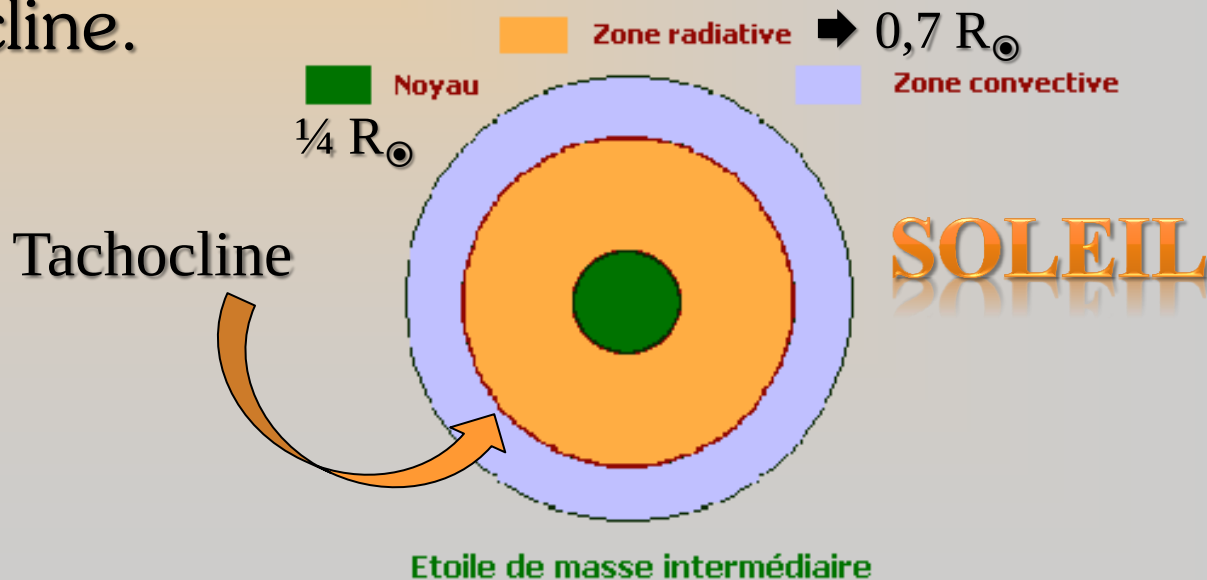




L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ Zone radiative / Zone convective

- Les étoiles de la séquence principale qui vont de $0,3$ à $1,5 M_{\odot}$ ont une zone radiative séparée de la zone convective par la tachocline.

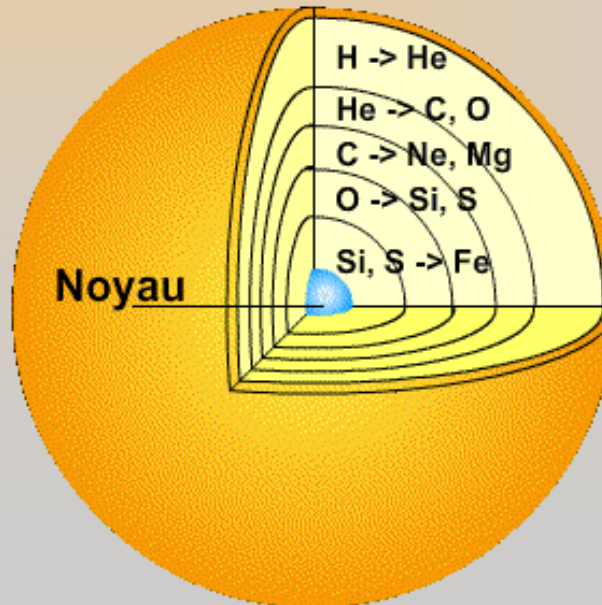




L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ Zone radiative / Zone convective

- Dans les étoiles de la séquence principale $\geq 1,5$ fois $M_{\odot}$, le noyau développe une structure en pelures d'oignon.



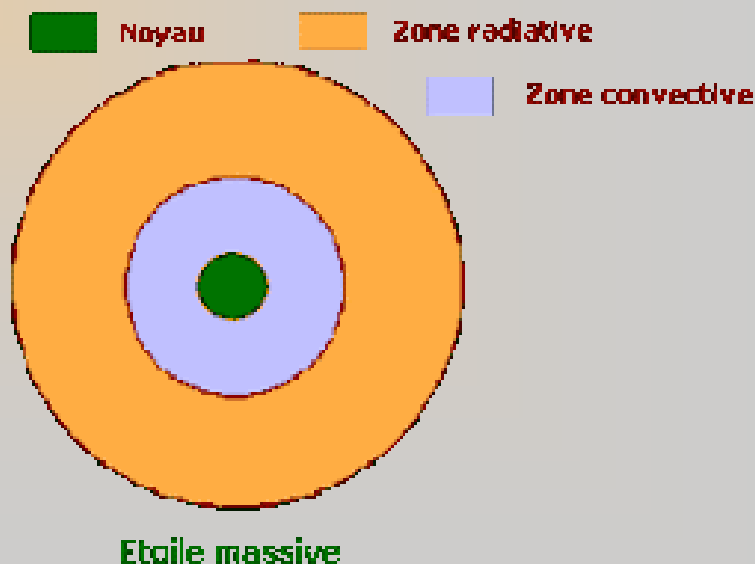


L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ Zone radiative / Zone convective

➤ Dans les étoiles de la séquence principale $\geq 1,5$ fois $M_{\odot}$, le noyau développe une structure en pelures d'oignon.

➤ La zone radiative
 ↑ graduellement au
 dépend de la zone
 convective.



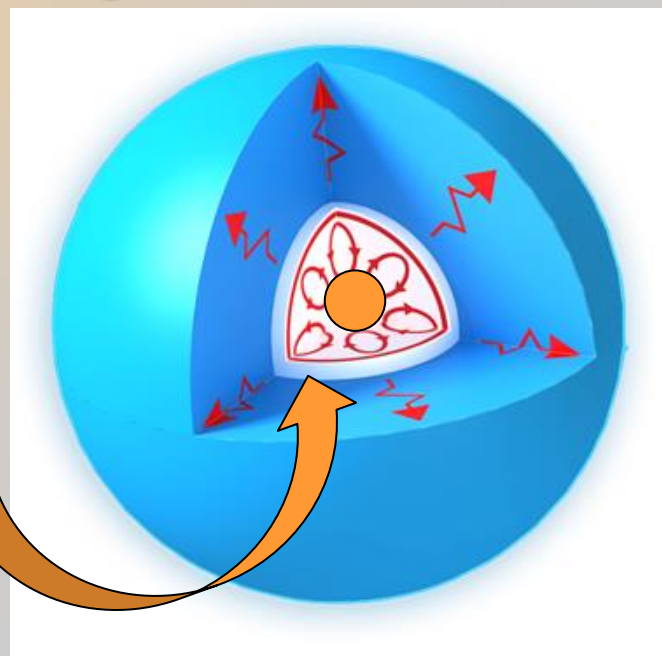


L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ Zone radiative / Zone convective

- Dans les étoiles de la séquence principale $\geq 1,5$ fois $M_{\odot}$, le noyau développe une structure en pelures d'oignon.
- La zone radiative
 ↑ graduellement au
 dépend de la zone
 convective.

Il y a une zone
convective périnucléaire





L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ Zone radiative / Zone convective

- Dans les étoiles de la séquence principale $\geq 1,5$ fois $M_{\odot}$, le noyau développe une structure en pelures d'oignon.
- Dans les étoiles très massives, la zone radiative s'étend jusqu'à la surface.

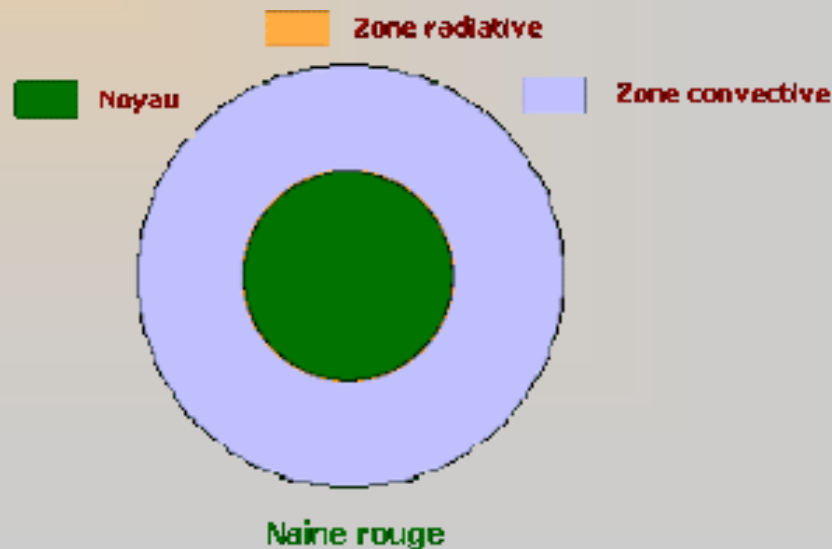




L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ Zone radiative / Zone convective

- Les étoiles de la séquence principale $\leq 0,3$ fois $M_{\odot}$ n'ont pas de zone radiative et la zone convective s'étend du noyau jusqu'à la surface de l'étoile.





L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

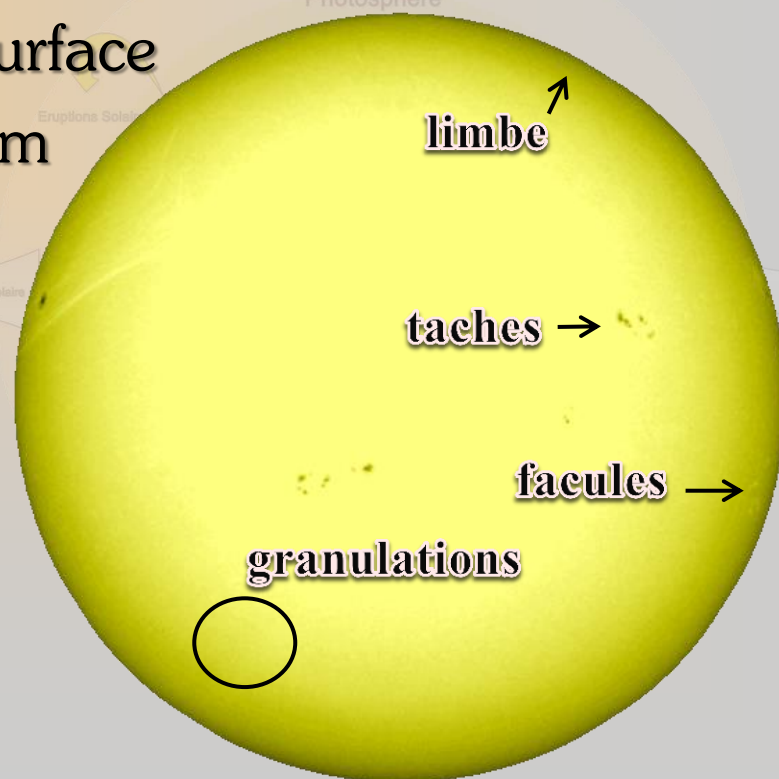
★ La Photosphère (la Surface)

➤ C'est ce que nous voyons du Soleil

- $T^{\circ} = 5\,800\text{ K}$ en surface
- Épaisseur = 300 km

➤ On y découvre :

- Granulations
- Taches
- Facules

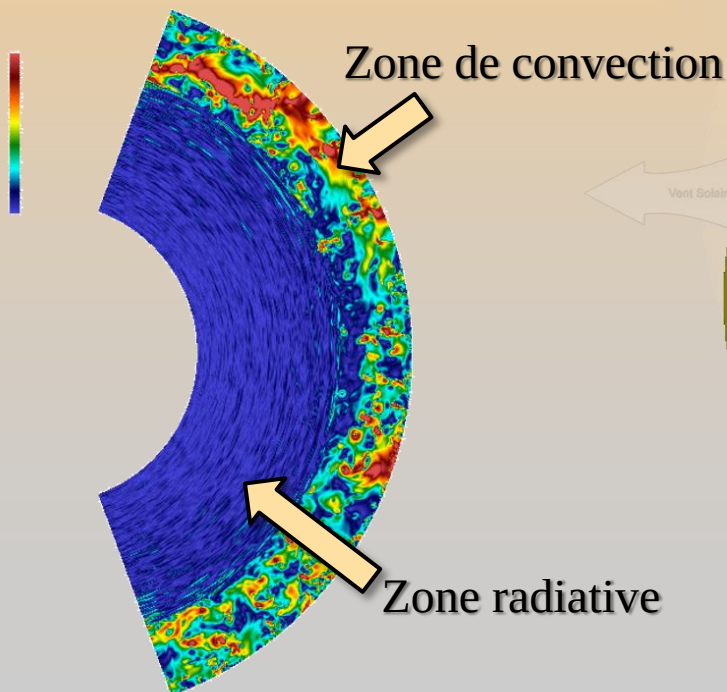




L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Photosphère (la Surface)

- Les **granulations** sont les sommets des bulles de convection.





L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Photosphère (la Surface)

- Les **granulations** sont les sommets des bulles de convection.



Auto organisation de cellules de Bénard dans acétone chauffée



Bulles de convection du Soleil
Photosphère

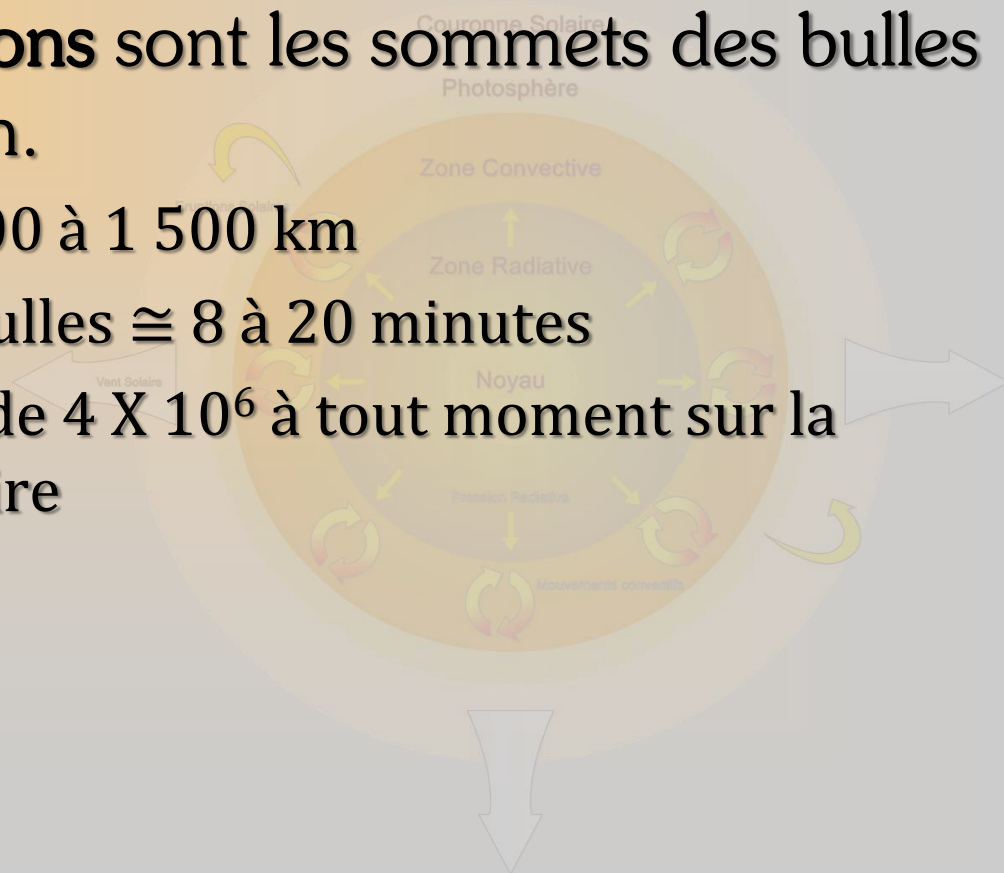


L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Photosphère (la Surface)

➤ Les **granulations** sont les sommets des bulles de convection.

- Taille $\cong 1\,000$ à $1\,500$ km
- Durée des bulles $\cong 8$ à 20 minutes
- Au nombre de 4×10^6 à tout moment sur la surface solaire



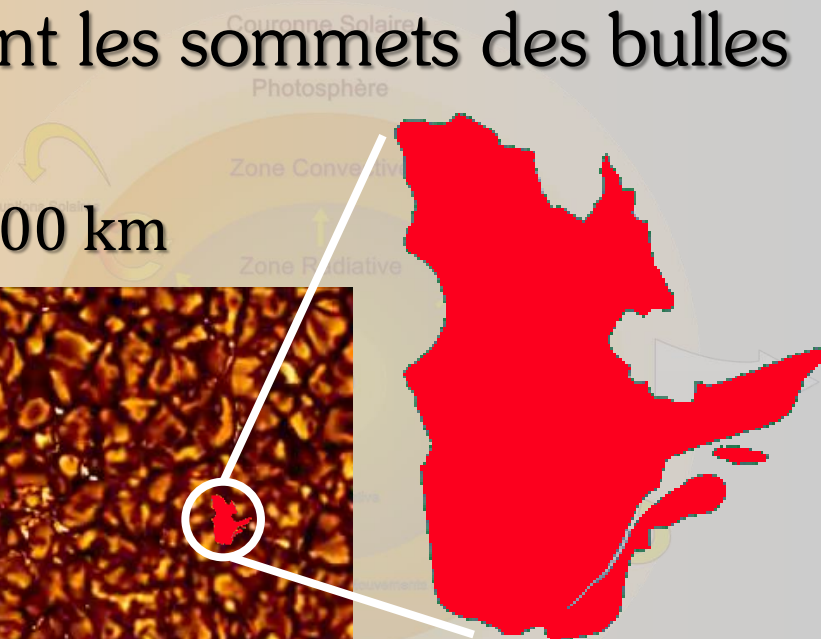
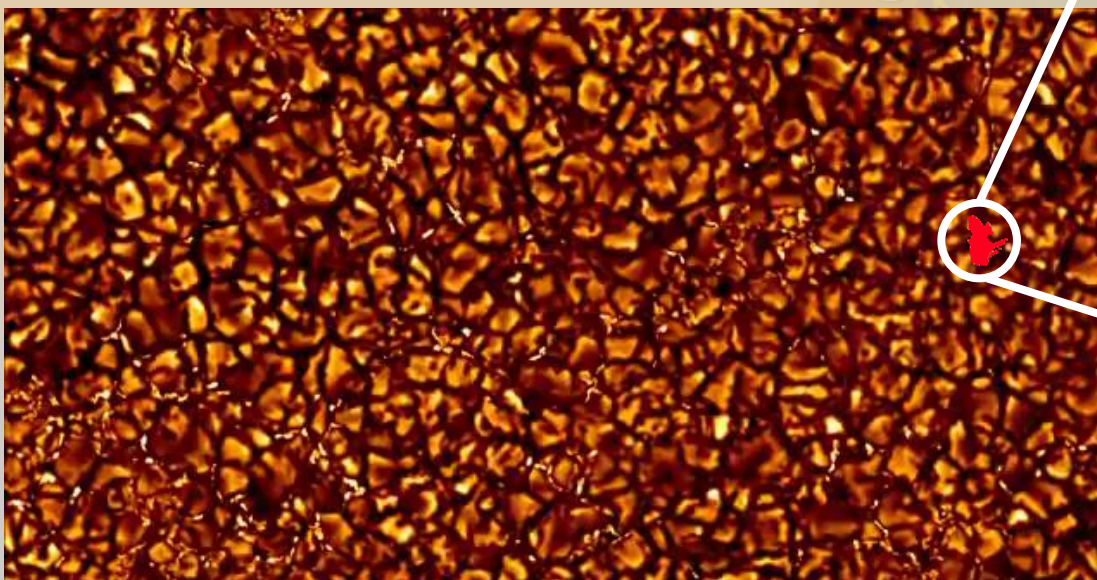


L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Photosphère (la Surface)

➤ Les **granulations** sont les sommets des bulles de convection.

■ Taille $\cong$ 1 000 à 1 500 km

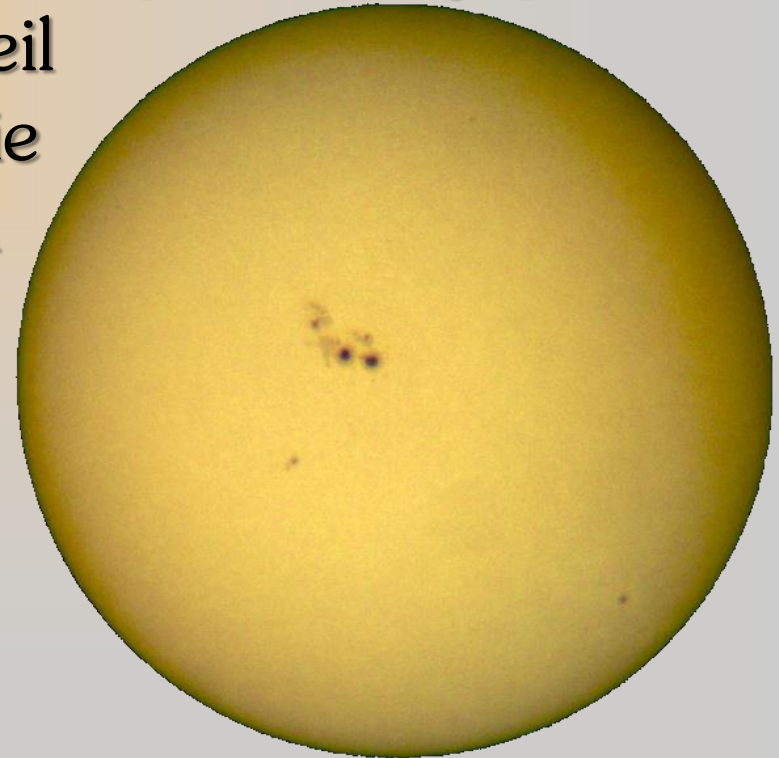




L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Photosphère (la Surface)

- Les **taches** sont formées par le perçage de la surface du Soleil aux endroits de sortie des lignes locales du champ magnétique.



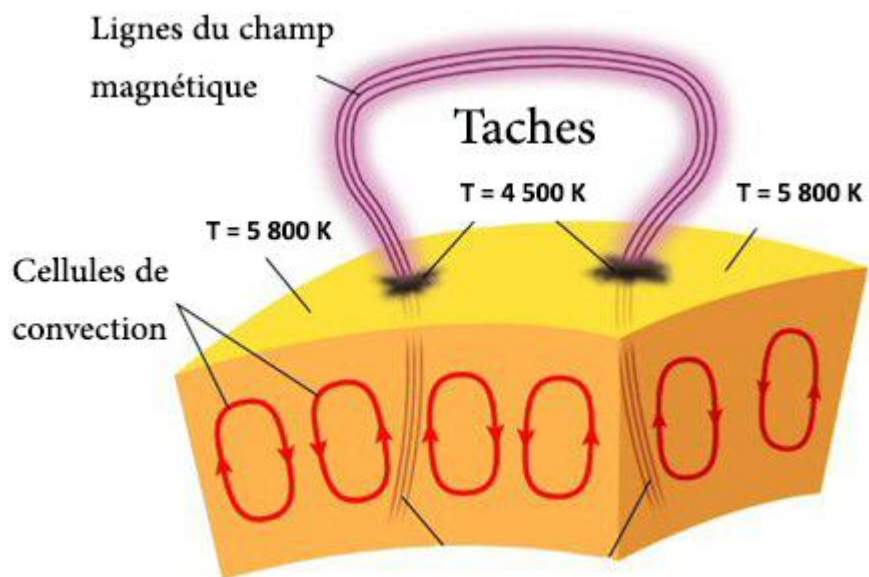


L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE



★ La Photosphère (la Surface)

- Les **taches** sont formées par le perçage de la surface du Soleil aux endroits de sortie des lignes locales du champ magnétique.



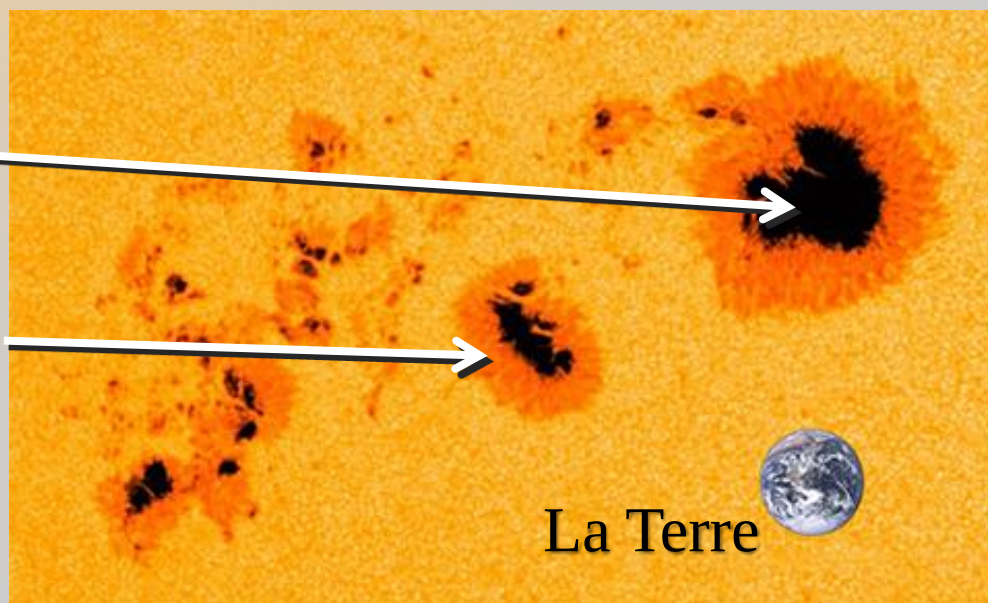


L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Photosphère (la Surface)

- Les **taches** sont plus *froides* que la photosphère environnante (3 000 à 4 500 K).
 - Elles nous apparaissent sombres (par contraste)

- On distingue l'*ombre* et la *pénombre*.





L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE



★ La Photosphère (la Surface)

➤ Les taches *évoluent* (elles changent).

- La durée moyenne des taches = 2 semaines, mais elles peuvent durer jusqu'à deux mois (deux périodes de rotation solaire).

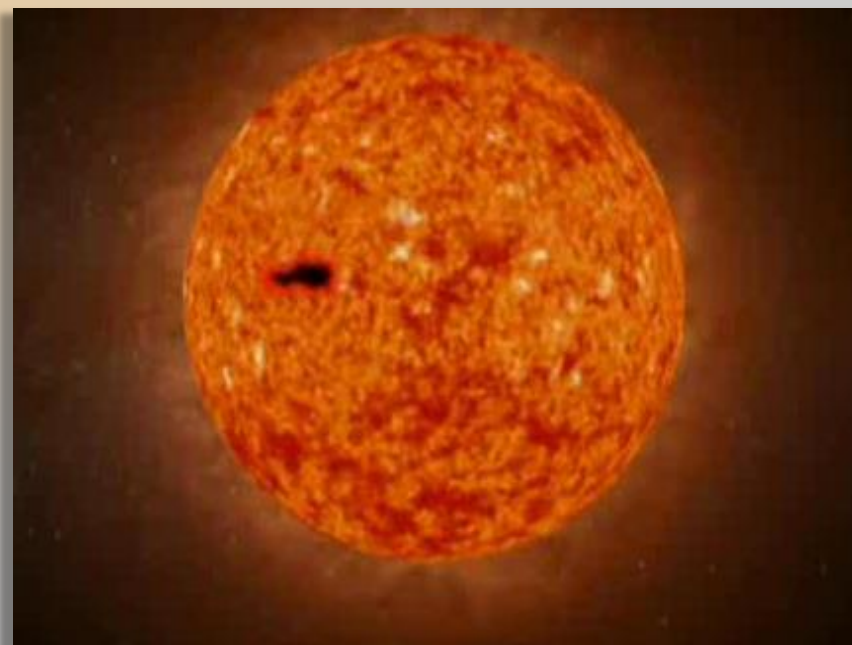




L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Photosphère (la Surface)

- Les **taches** se déplacent à des vitesses variables en fonction de la rotation du Soleil (plus vite à l'équateur qu'aux pôles).

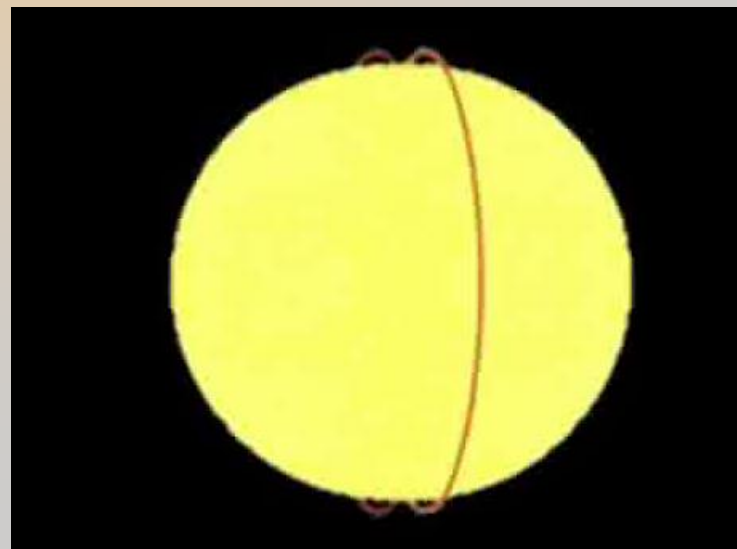




L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Photosphère (la Surface)

- La rotation différenciée du Soleil enroule les lignes du champs magnétique.
- L'ensemble devient anarchique.





L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE



★ La Photosphère (la Surface)

- Le nombre de taches varie...
- ... selon un cycle de ± 11 ans.





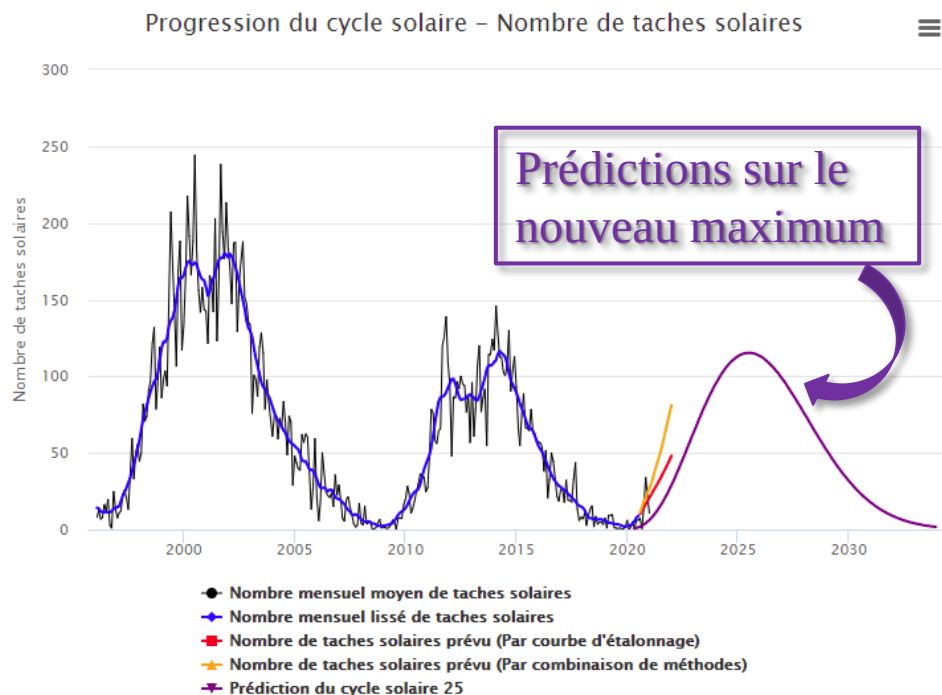
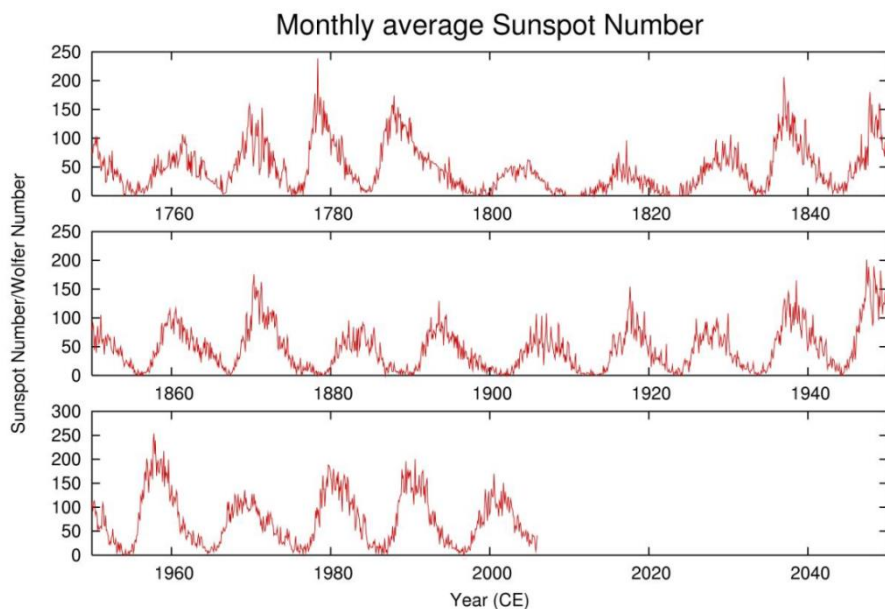
L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE



★ La Photosphère (la Surface)

➤ Le nombre de taches varie...

➤ ... de 0 à 250



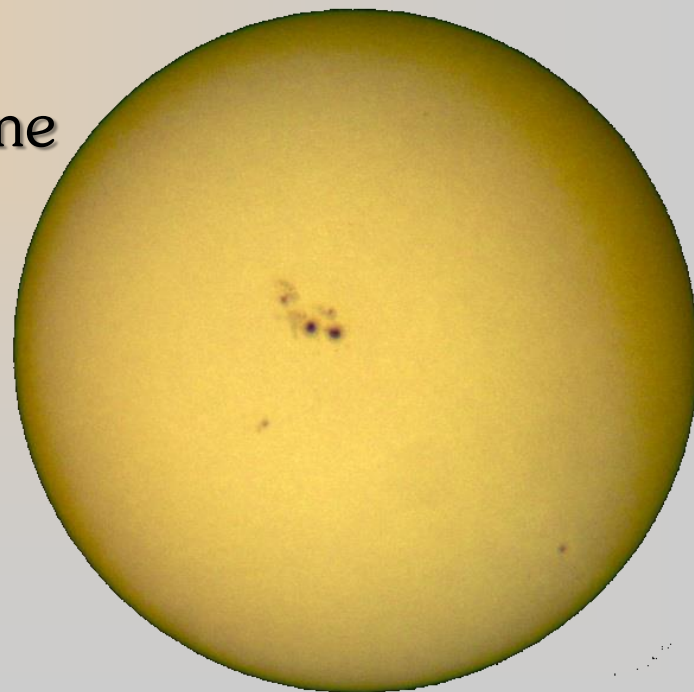


L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Photosphère (la Surface)

➤ Le cycle solaire

- Relation entre le nombre de taches et l'activité solaire.
- Le cycle est le métronome de l'activité du Soleil :
 - Son éclat
 - Son flux radiatif
 - ...et ses sautes d'humeur



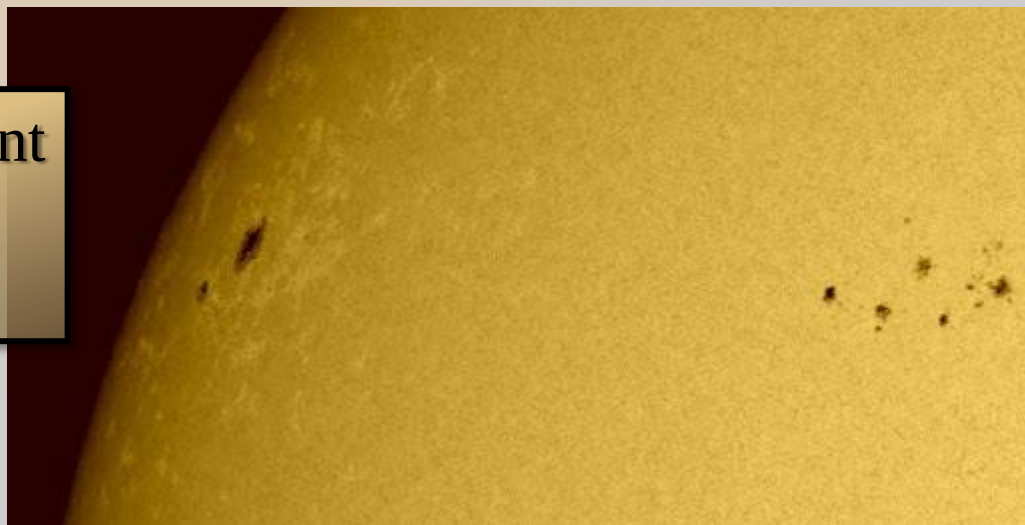


L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Photosphère (la Surface)

- Paradoxalement, c'est lorsque le Soleil a le plus de taches qu'il est le plus lumineux.
 - La quantité de **facules** est $\propto$ au nombre de taches.
 - Les facules sont chaudes ($\cong 7\,800\text{ K}$).

Les facules sont plus facilement visibles lorsqu'elles sont près du limbe solaire

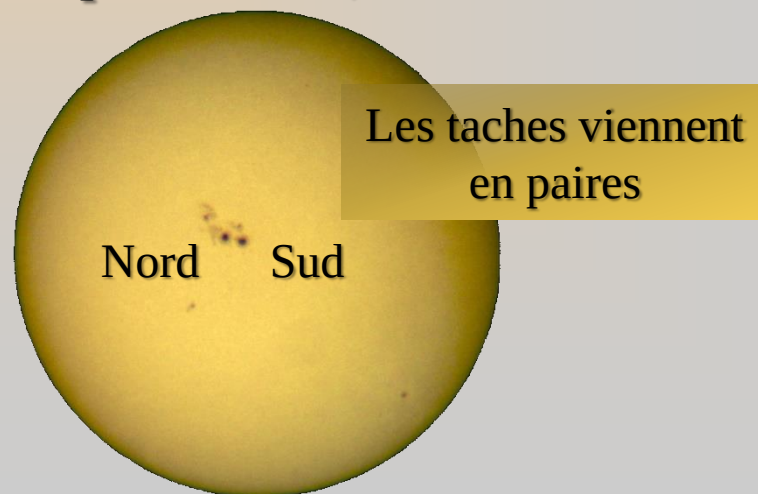
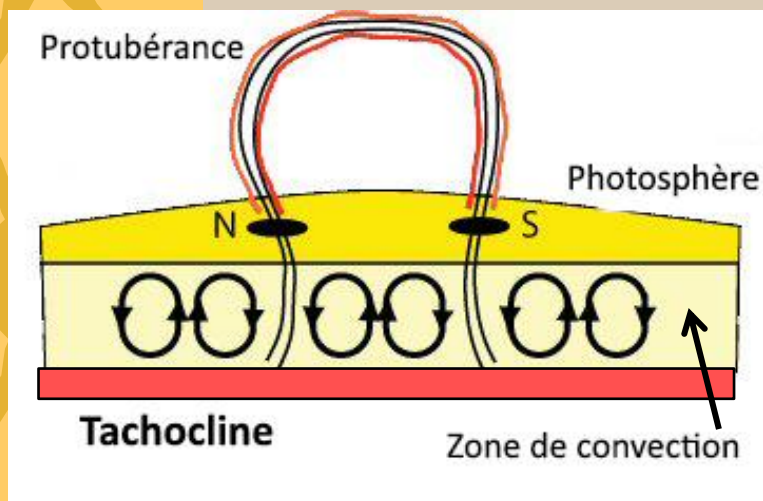




L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Photosphère (la Surface)

- Les taches proviennent de la tachocline.
- Les lignes du champ magnétique traversent la Zone de convection.
- Les taches ont une polarité (comme un aimant).





L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Photosphère (la Surface)

➤ C'est au niveau des taches que jaillissent les *protubérances* solaires.

- Elles sont faites de particules chargées (e^- , p^+ , α) du plasma qui s'enroulent autour des lignes de force du champ magnétique local. Elles prennent un aspect dipolaire.





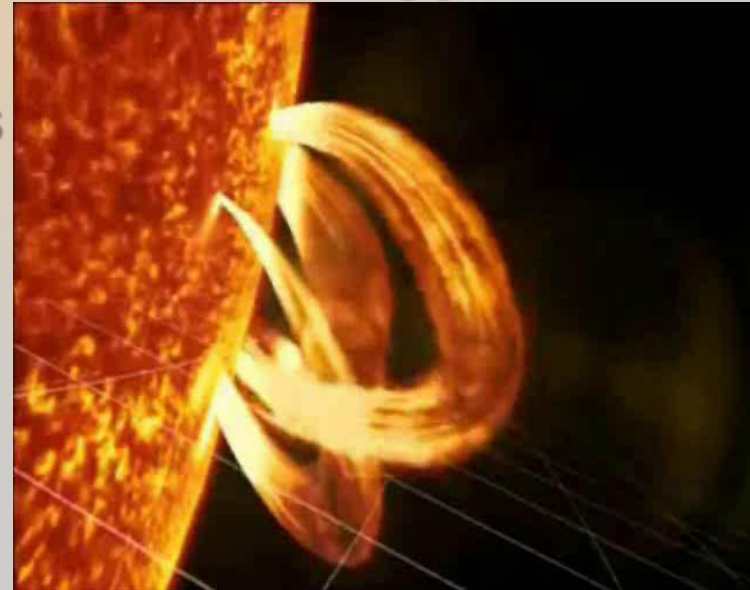
L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Photosphère (la Surface)

➤ C'est au niveau des taches que jaillissent les *protubérances* solaires.

- Parfois une protubérance laisse échapper dans l'espace une masse de particules chargées poussées par les vents solaires.

C'est l'*éjection de masse coronale*.





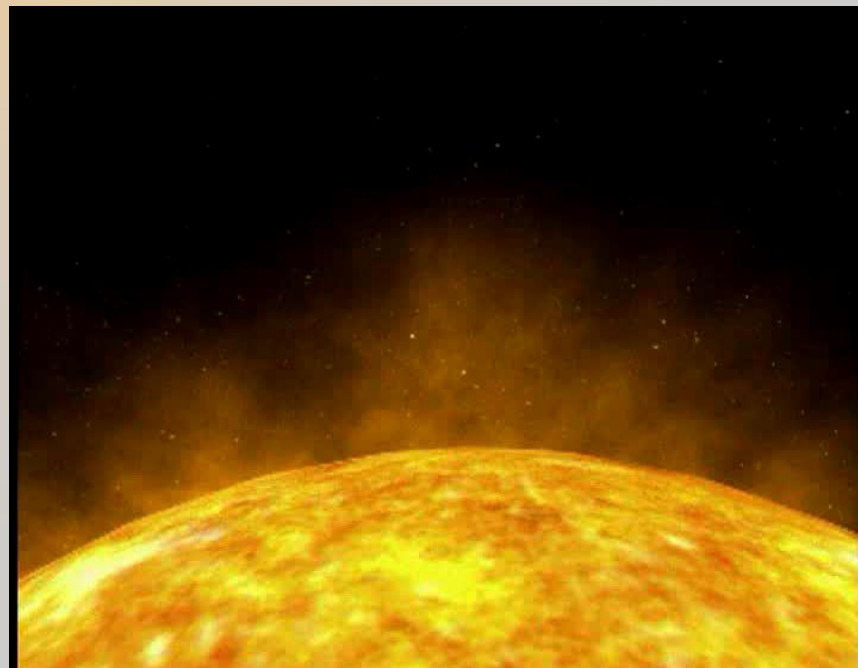
L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Photosphère (la Surface)

➤ Éjection de masse coronale.

■ Lorsqu'elles atteignent la Terre, elles peuvent causer :

- Aurores boréales
- Dommages aux infrastructures électriques
- Dommages aux appareils électroniques
- Dommages aux oléoducs





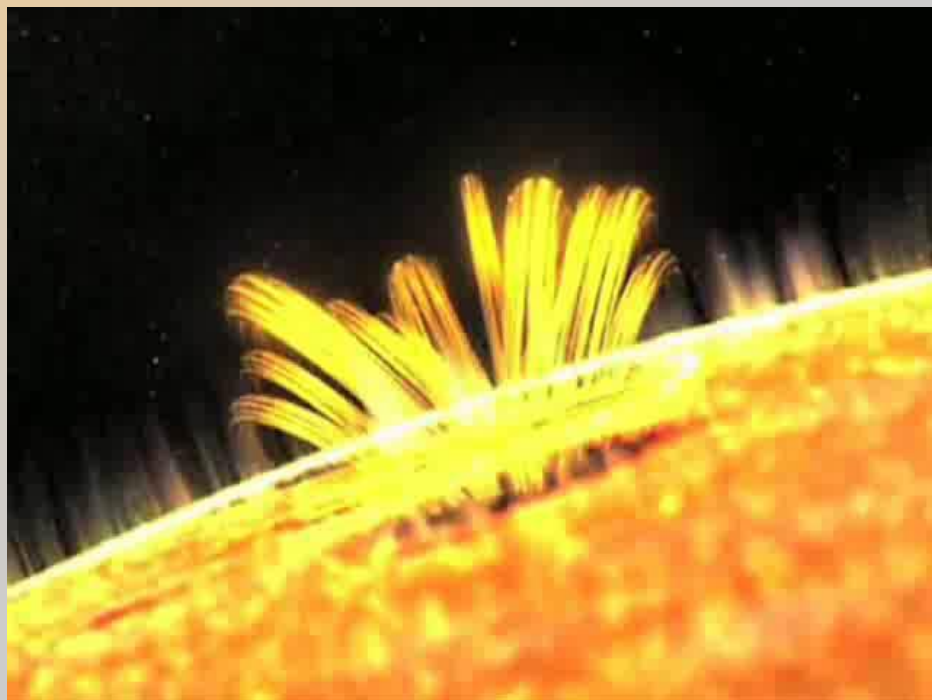
L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE



★ La Photosphère (la Surface)

➤ Animée d'*oscillations* :

- 25 mètres de hauteur q 5 minutes
- On peut y observer des tremblements de surface et tsunamis.





L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ La Photosphère (la Surface)

➤ Voyage à la surface du Soleil

Ce n'est pas un
milieu de tout repos

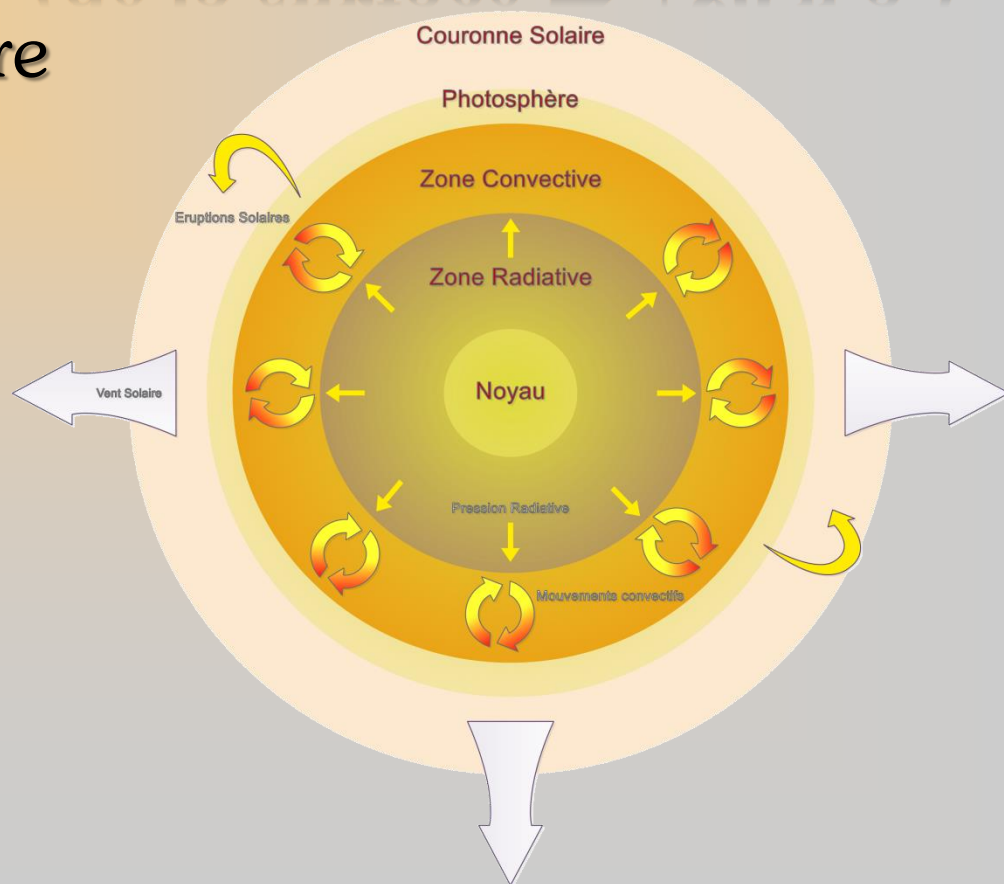




L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ L'atmosphère (de la surface ➡ ± 80 u.a.)

- Chromosphère
- Couronne
- Héliosphère





L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

- ★ L'atmosphère (de la surface ➡ ± 80 u.a.)
 - Chromosphère

Sphère de couleur

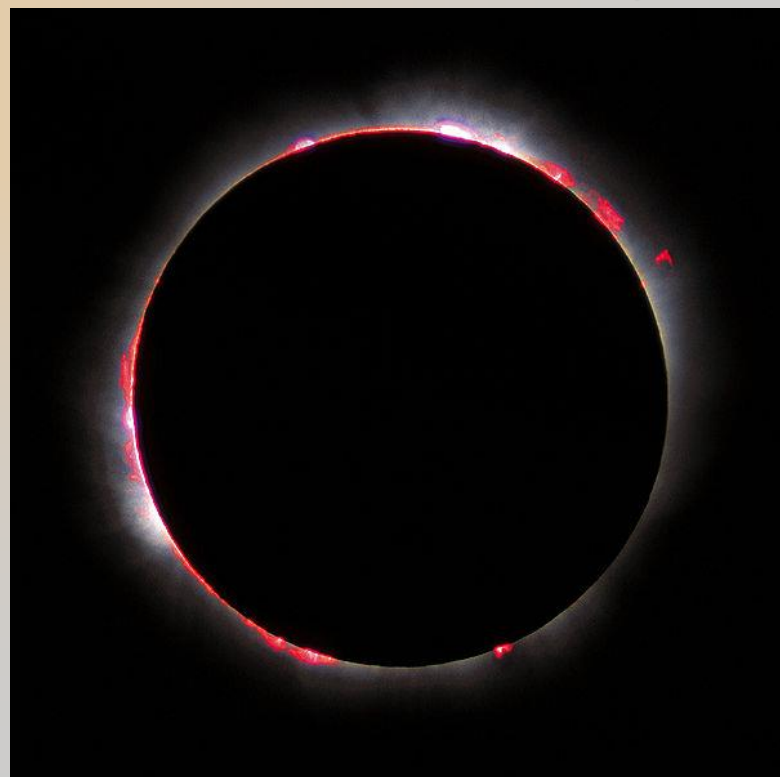


L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ L'atmosphère (de la surface ➡ ± 80 u.a.)

➤ Chromosphère (2 000 km de diamètre)

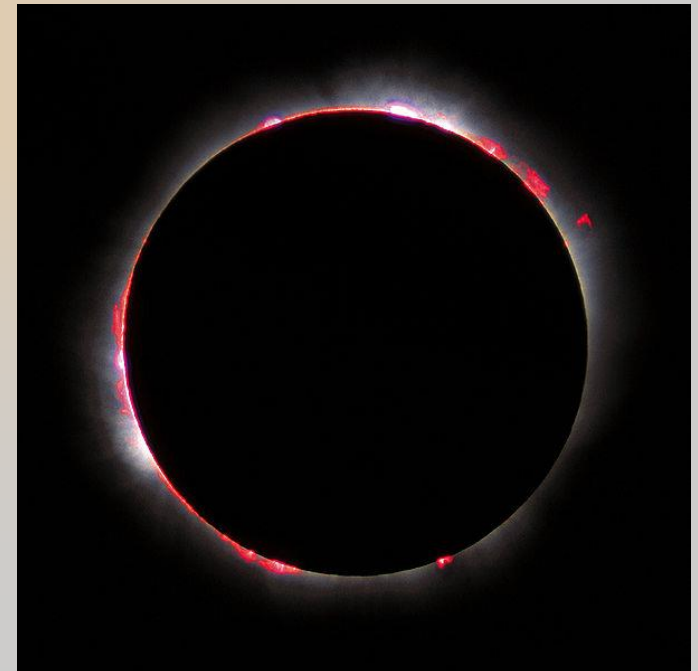
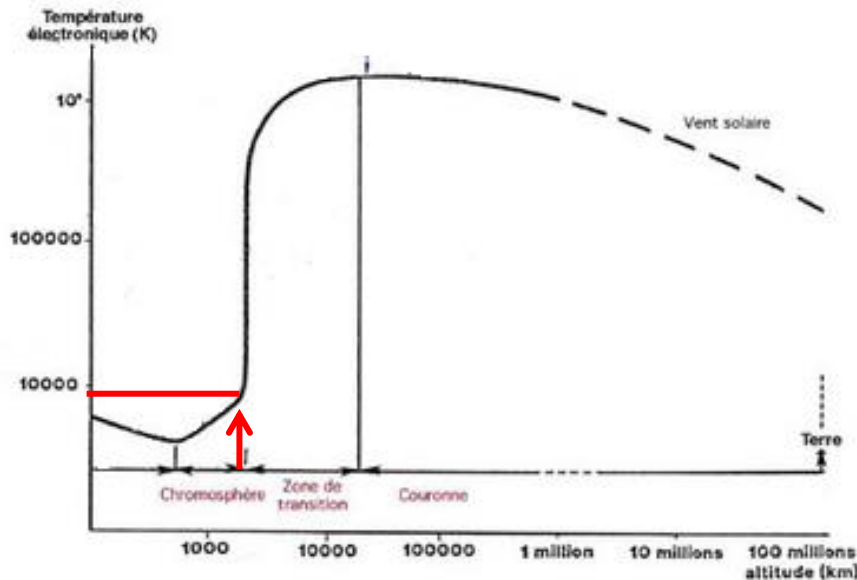
- Rouge ($H\alpha$)
- On y voit des spicules.





L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

- ★ L'atmosphère (de la surface ➔ ± 80 u.a.)
 - Chromosphère (2 000 km de diamètre)
 - T° passe de 4 000 à $\approx 10\,000$ K





L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

- ★ L'atmosphère (de la surface ➡ ± 80 u.a.)
 - Couronne ($\approx 70 R_{\odot}$)
 - Visible lors des éclipses totales de Soleil
 - Émet $< 1\%$ dans le visible ; surtout Ultra-violet



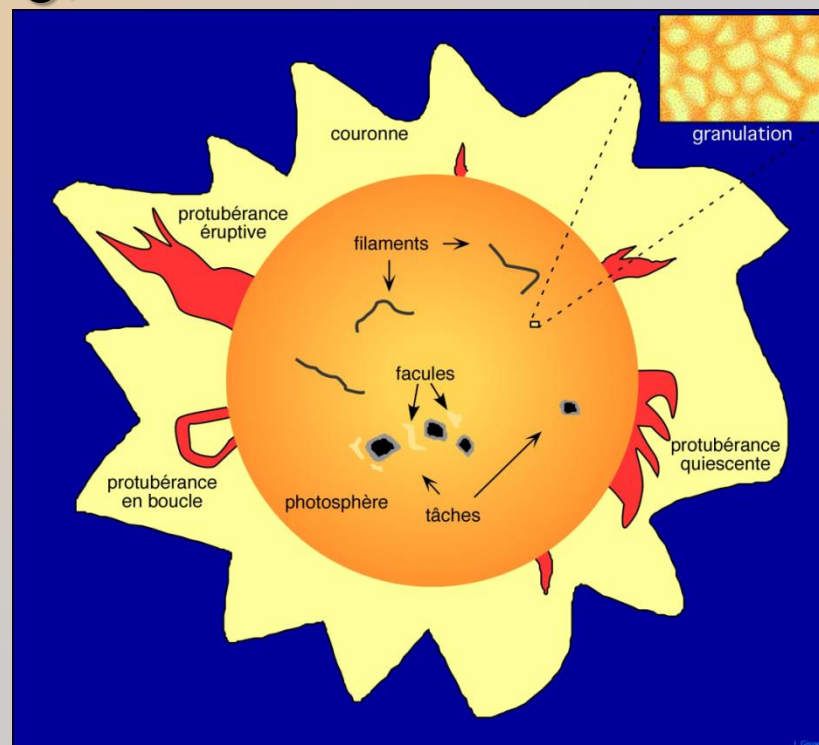


L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ L'atmosphère (de la surface ➔ ± 80 u.a.)

➤ Couronne ($\approx 70 R_{\odot}$)

■ Zone des spicules et protubérances



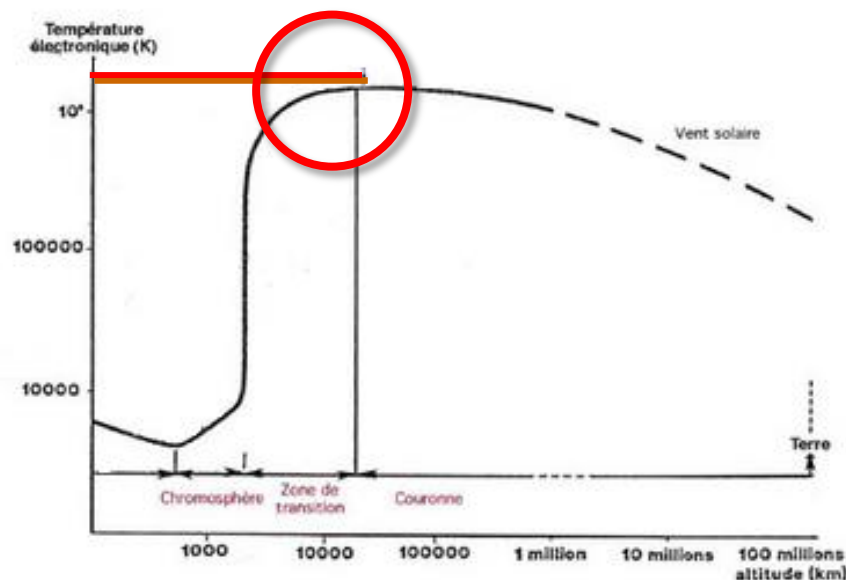


L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ L'atmosphère (de la surface ➡ ± 80 u.a.)

➤ Couronne ($\approx 70 R_{\odot}$)

- Faite de plasma ionisé
- La T° atteint jusqu'à 2 000 000 K





L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ L'atmosphère (de la surface ➡ ± 80 u.a.)

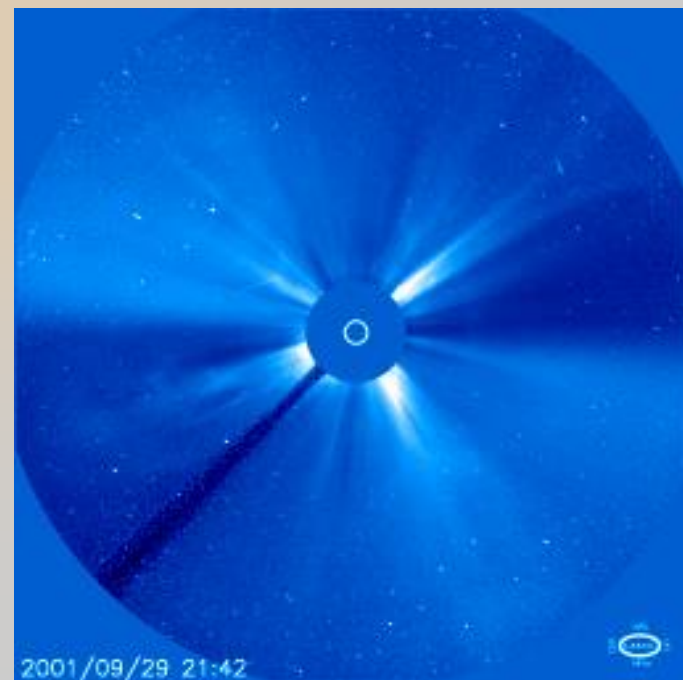
➤ Héliosphère : c'est le domaine des vents solaires

- Transporte des particules chargées venant du plasma solaire (éruptions, couronne).
 - e^- , p^+ , α (4_2He)
- La vitesse des vents solaires va de 1 440 000 à 2 800 000 km/h.
 - Atteignent la Terre en 2 à 4 jours



L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

- ★ L'atmosphère (de la surface ➡ ± 80 u.a.)
 - Héliosphère : c'est le domaine des vents solaires





L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE



★ L'atmosphère (de la surface ➡ ± 80 u.a.)

➤ Héliosphère : c'est le domaine des vents solaires

- Transporte des particules chargées venant du plasma solaire (éruptions, couronne).
 - e^- , p^+ , α (4_2He)
- La vitesse des vents solaires va de 1 440 000 à 2 800 000 km/h.
 - Atteignent la Terre en 2 à 4 jours
- La forme est celle d'un front d'ondes spiralées.



L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

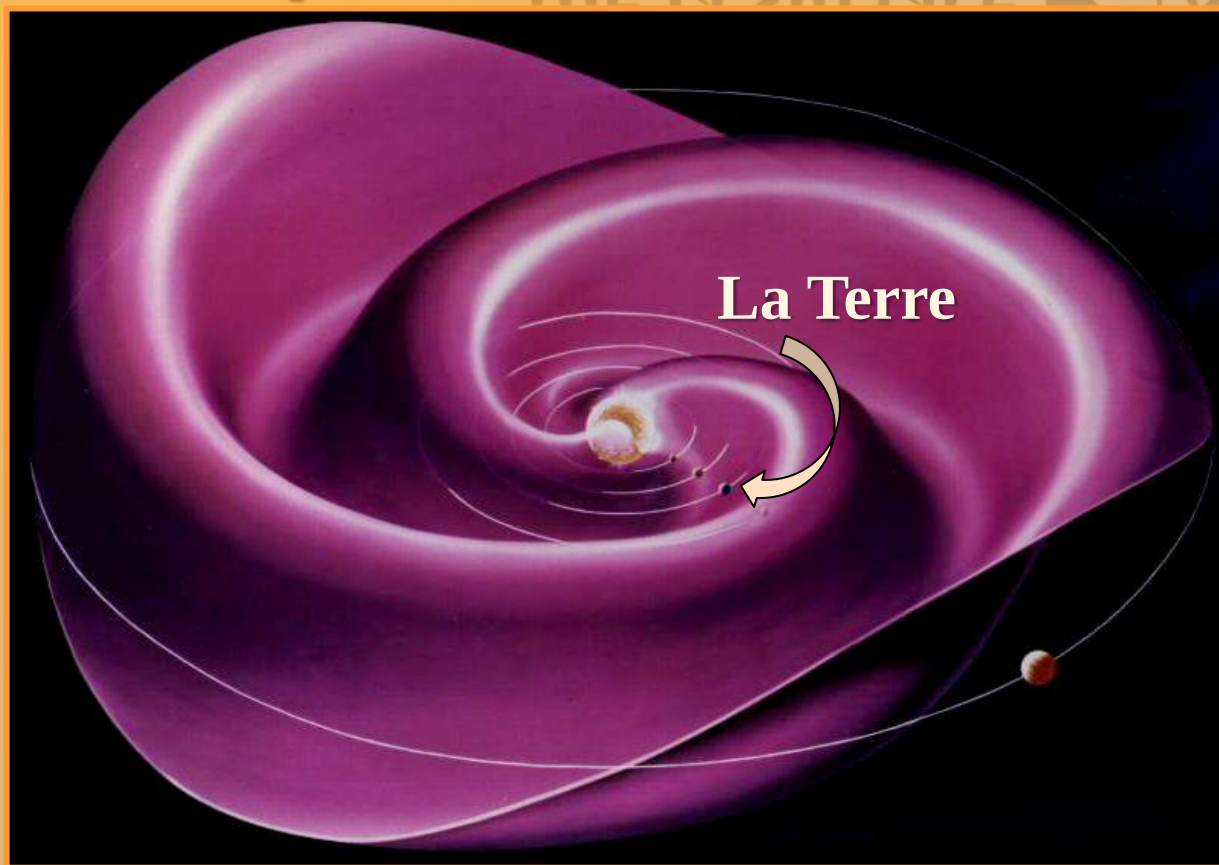
- ★ L'atmosphère (de la surface ➡ ± 80 u.a.)
 - Héliosphère : c'est le domaine des vents solaires
 - La forme est celle d'un front d'ondes spiralées.





L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ L'atmosphère (de la surface ➡ ± 80 u.a.)



iralées.



L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE



★ L'atmosphère (de la surface ➡ ± 80 u.a.)

➤ Héliosphère : c'est le domaine des vents solaires

■ La forme est aussi celle d'une bulle allongée.

■ **Héliopause** : l'extinction des vents solaires
(≈ 80 à 100 U.A.)



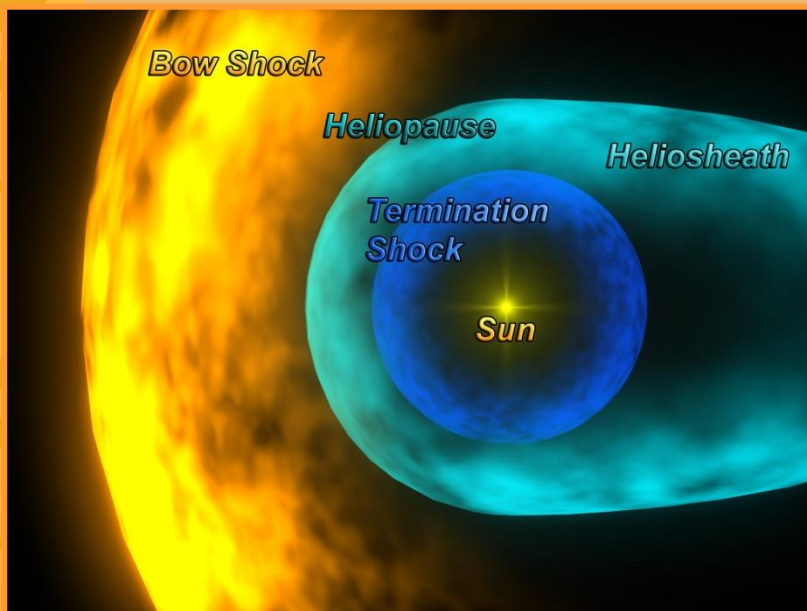


L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ L'atmosphère (de la surface ➡ ± 80 u.a.)

➤ Héliosphère : c'est le domaine des vents solaires

■ La forme est aussi celle d'une bulle allongée.



■ La bulle est aplatie au front de la direction du Soleil au cours de son voyage dans la galaxie.



L'ANATOMIE INTERNE SPÉCIFIQUE

★ L'atmosphère (de la surface ➡ ± 80 u.a.)

➤ Héliosphère : c'est le domaine des vents solaires

■ Les vents solaires transportent de la matière entraînant une perte de masse du Soleil.

- Cette perte de masse est de 5×10^9 tonnes/heure...
- ... soit une $M_{\odot}$ aux 150×10^6 années.
- Jusqu'à maintenant, le Soleil a perdu 0,01 % de sa masse par les vents solaires.



MESSAGES CLÉS

- ★ Les étoiles sur la séquence principale sont dans un état d'équilibre hydrostatique. Deux forces s'opposent.
 - La *pression de lumière* générée par la fusion nucléaire au sein du noyau tend à dilater l'étoile...
 - Tandis que la *force gravitationnelle* tend à la contracter... jusqu'à l'atteinte d'un volume d'équilibre où elle se maintient.
- ★ L'anatomie interne de l'étoile stable comprend trois couches :
 - Le noyau
 - La zone radiative
 - La zone convective

} La position et les relations de chacune dépendent de la masse de l'étoile.



MESSAGES CLÉS

- ★ Le **noyau** du Soleil anime tout le système solaire. Il fournit l'énergie de la vie sur Terre.
- ★ La **Zone radiative** thermalise les rayons γ de haute énergie produits par les réactions thermonucléaires. Ils sont multipliés et distribués dans toute la gamme du spectre électromagnétique.
- ★ La **Tachocline** et la **Zone convective** génèrent les champs magnétiques du Soleil et sont responsables de la rotation différenciée de l'étoile.
- ★ La **Photosphère** est la surface visible du Soleil. Le nombre de taches est représentatif de la puissance radiative de l'étoile. Elles évoluent sur un cycle variable en durée et en intensité de ± 11 ans.





MESSAGES CLÉS

- ★ L'atmosphère du Soleil comprend :
 - La Chromosphère
 - La Couronne
 - L'Héliosphère qui est le lieu des vents solaires.
- ★ L'**Héliopause** représente la limite de l'influence électromagnétique du Soleil...
- ★ ...mais la portée gravitationnelle du Soleil s'étend bien au-delà, jusqu'à l'hypothétique nuage de Oort dont la limite se situerait entre 1 et 2 années-lumière de notre étoile.



RÉFÉRENCES

- ★ Astronomie et Astrophysique, 2^e édition
Séguin M, Villeneuve B
Éditions du Renouveau Pédagogique Inc., 2002
- ★ Wikipedia :
 - Étoile : <https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89toile>
https://fr.wikipedia.org/wiki/Structure_stellaire
<http://www.cosmovisions.com/etst.htm>
 - Noyau stellaire : https://fr.wikipedia.org/wiki/Noyau_solaire
 - Zone radiative, convective, photosphère, atmosphère :
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Soleil>