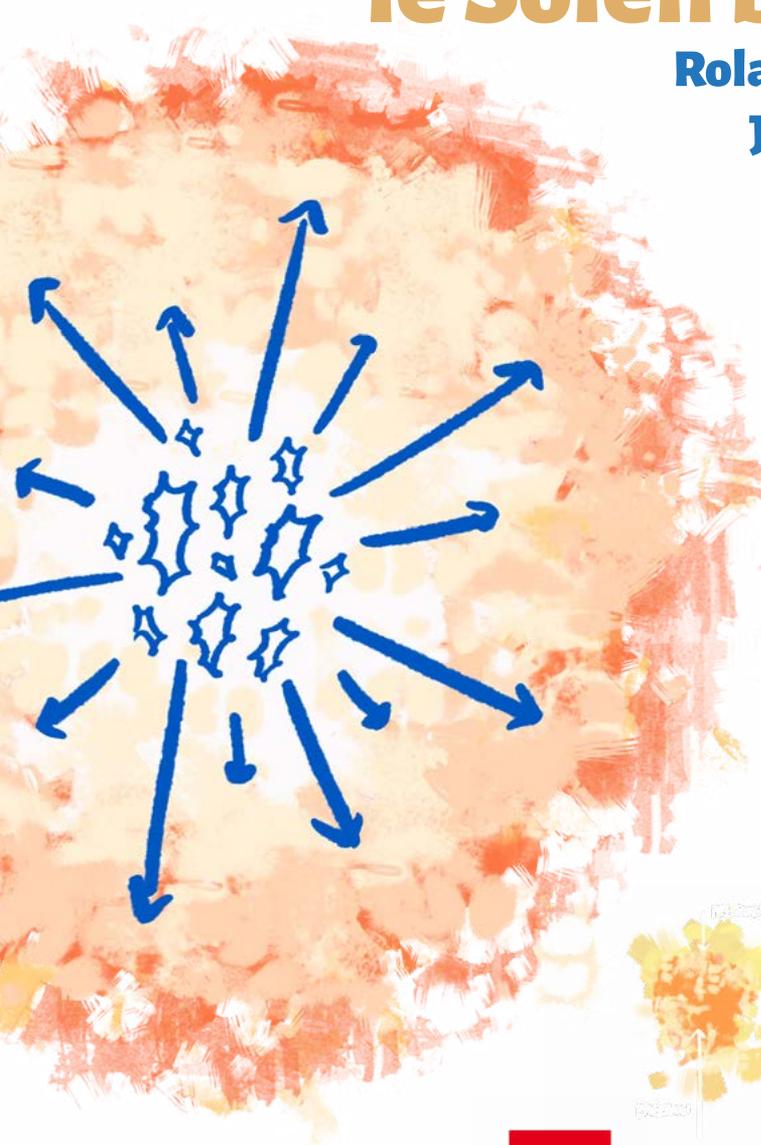




Pourquoi le Soleil brille ?

Roland Lehoucq

Judith Lorne



Pourquoi le Soleil brille ?

Roland Lehoucq
astrophysicien au CEA

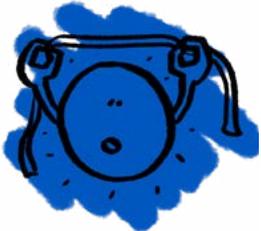
Judith Lorne
étudiante en DSAA Design
d'Illustration scientifique

Imprimé en 2022
à l'école Estienne



Qui suis-je ?

DIAMÈTRE



1 392 000 km

MASSE



2×10^{30} kg

TEMPÉRATURE



5 500 °c
(5 770 K)

LUMINOSITÉ



$3,8 \times 10^{26}$ W

COMPOSITION (EN MASSE)

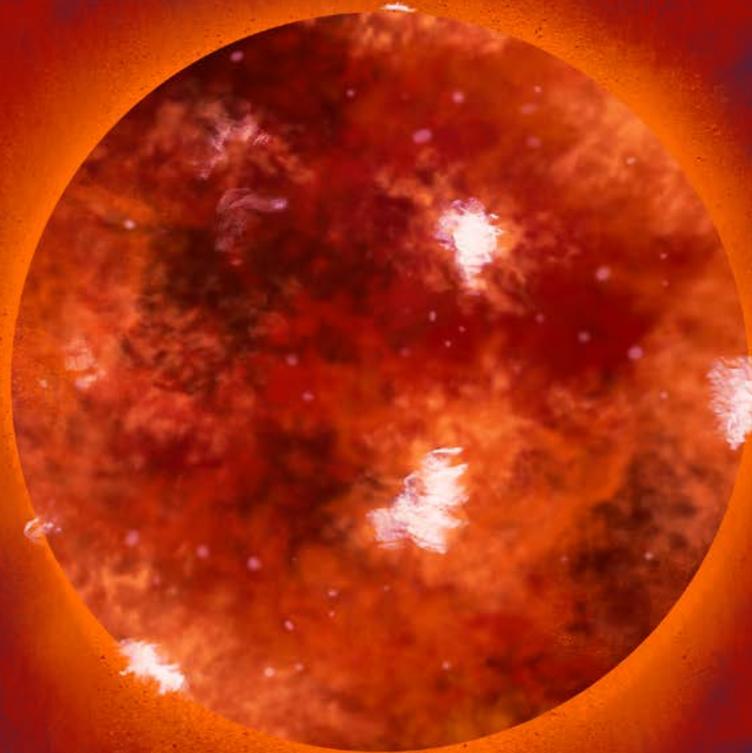


73% H, 25% He
2% ÉLÉMENTS PLUS
LOURDS

ÂGE



4,56 MILLIARDS
D'ANNÉES



Pourquoi le Soleil brille ?

FAISONS UN TOUR D'UN PEU PLUS PRÈS ...

Posons-nous tout d'abord quelques questions...

POURQUOI LE SOLEIL EST-IL SPHÉRIQUE ?

POURQUOI NE S'ÉPARILLE-T-IL PAS AUX QUATRE COINS DE LA GALAXIE ?

Le Soleil est sphérique car il est soumis à sa propre gravité !

La gravité est une force attractive qui ne dépend que de la distance : on dit qu'elle est à symétrie sphérique.



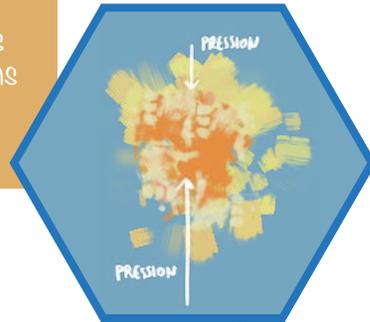
MAIS SI TOUTE LA MATIÈRE DU SOLEIL EST ATTIRÉE VERS SON CENTRE, L'ASTRE NE DEVRAIT-IL PAS S'EFFONDRE SUR LUI-MÊME ?

Pouf ! À plus le Soleil !

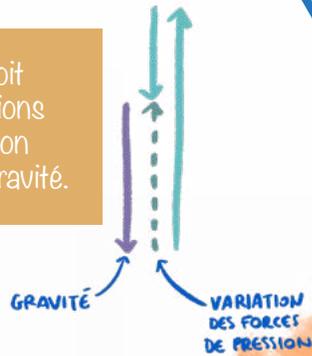


LE SOLEIL NE S'EFFONDRÉ PAS CAR LA GRAVITÉ N'EST PAS LA SEULE FORCE À AGIR, IL Y A AUSSI LA PRESSION DU GAZ SOLAIRE.

En tout point du Soleil, les forces de pression s'appliquent, et ce dans toutes les directions. Mais, elles ne sont pas partout égales.



Pour que le Soleil soit à l'équilibre, les variations des forces de pression doivent compenser la gravité.



RAAAH!
TOUT ÇA
POUR NE PAS
BOUGER...

C'EST L'ÉQUILIBRE HYDROSTATIQUE !

LA PRESSION AUGMENTE DONC AVEC LA PROFONDEUR !

déjà chaud

encore plus chaud

vraiment très chaud

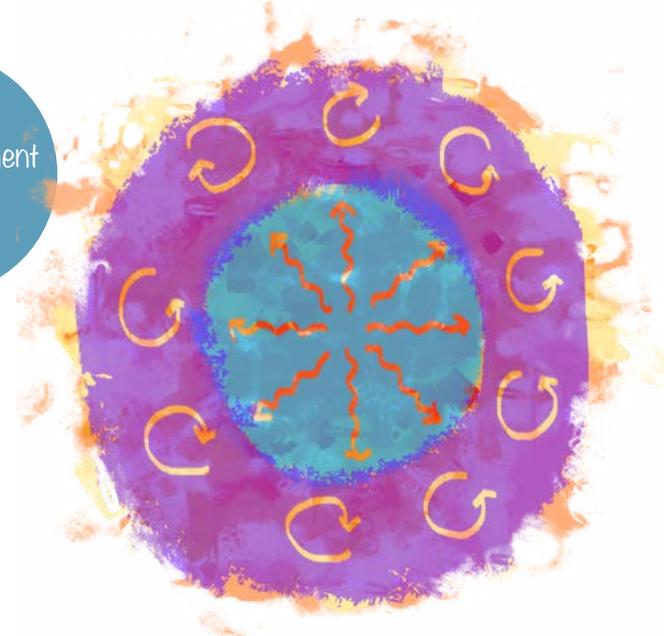
Mais plus la pression augmente, et plus la température augmente aussi !

LA DIFFÉRENCE DE TEMPÉRATURE ENTRE LE CENTRE ET LA SURFACE DÉCLENCHE UN TRANSFERT D'ÉNERGIE VERS LA SURFACE !

D'abord par rayonnement au centre



Puis par convection





MAIS L'ÉNERGIE DU SOLEIL
NE DEVRAIT-ELLE PAS S'ÉPUISER,
SINON QUELLE EN EST LA SOURCE ?

Les météorites!



FAUX

La contraction
gravitationnelle!



FAUX

Le charbon!



FAUX

Le noyau
des atomes

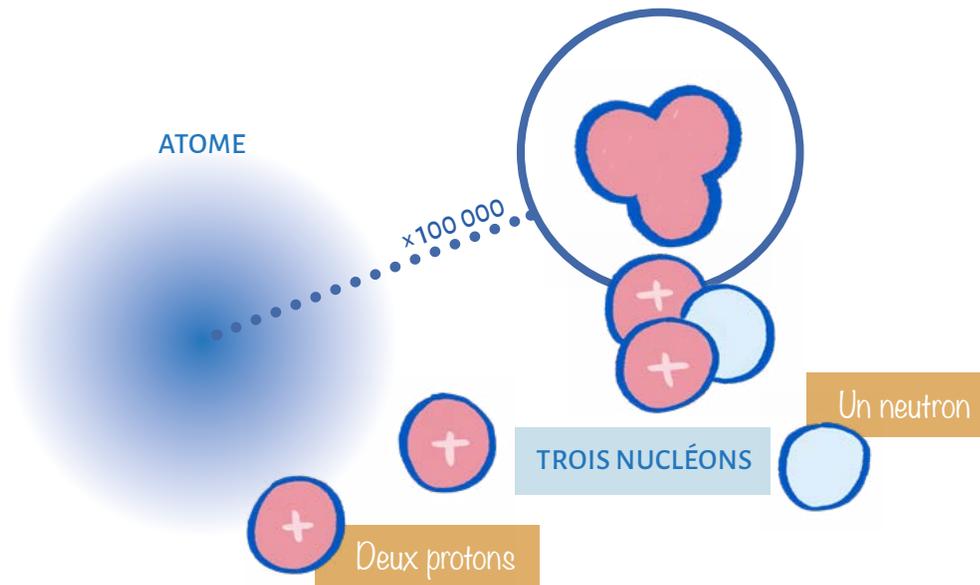


ON SE RAPPROCHE...

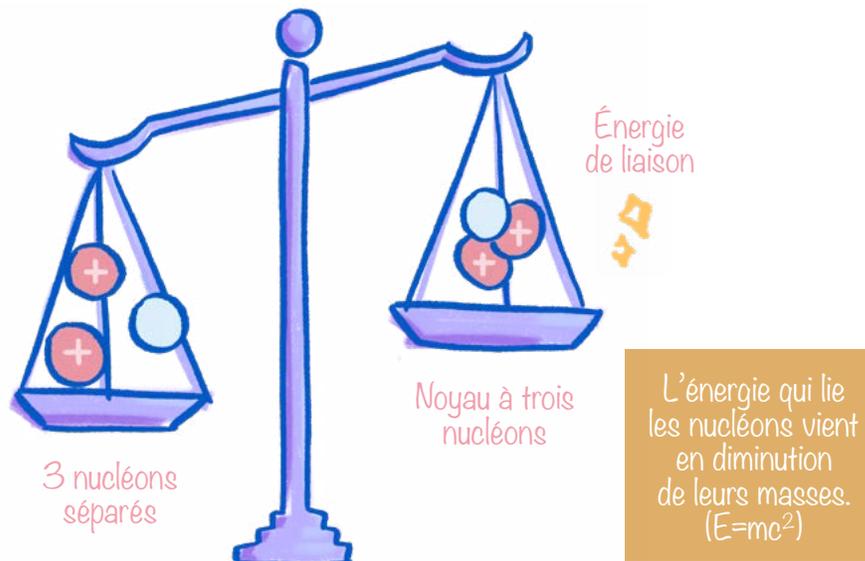
Voyons ça de plus près...



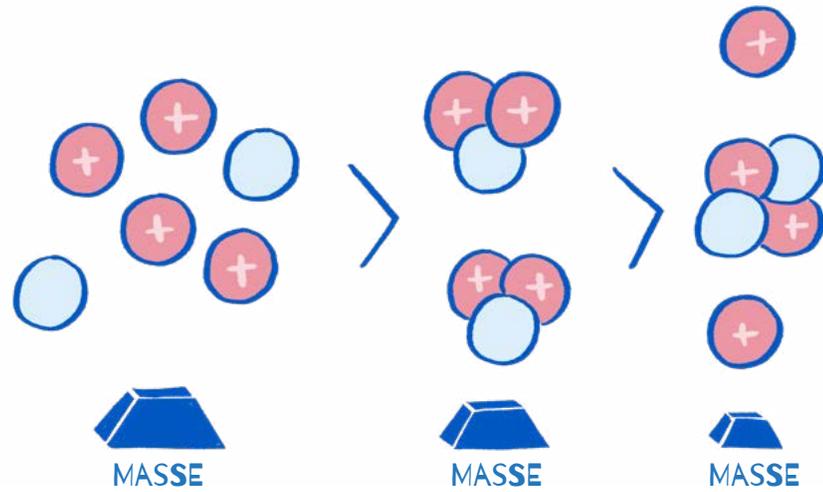
FAISONS UN ZOOM SUR LE NOYAU D'UN ATOME PARI MI D'AUTRES...



UN NOYAU EST PLUS LÉGER QUE LA SOMME DES MASSES
DES NUCLÉONS QUI LE CONSTITUENT.

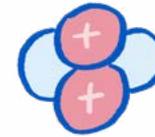


DES NUCLÉONS SÉPARÉS SONT PLUS MASSIFS QUE LIÉS ET
LES NOYAUX LÉGERS SONT PLUS MASSIFS SÉPARÉS QUE FUSIONNÉS !



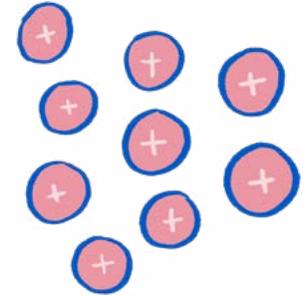
LE SOLEIL EST MAJORITAIREMENT COMPOSÉ D'HYDROGÈNE ET D'HÉLIUM.

10%
d'atomes d'hélium

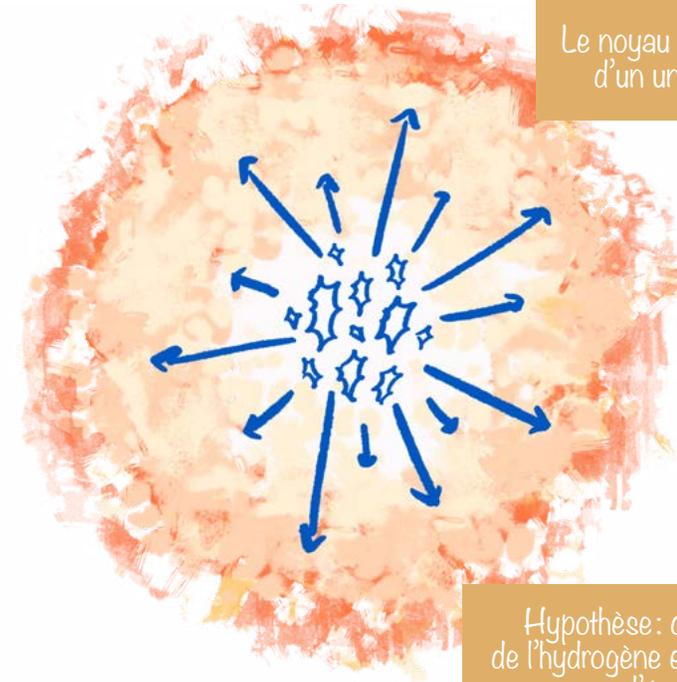
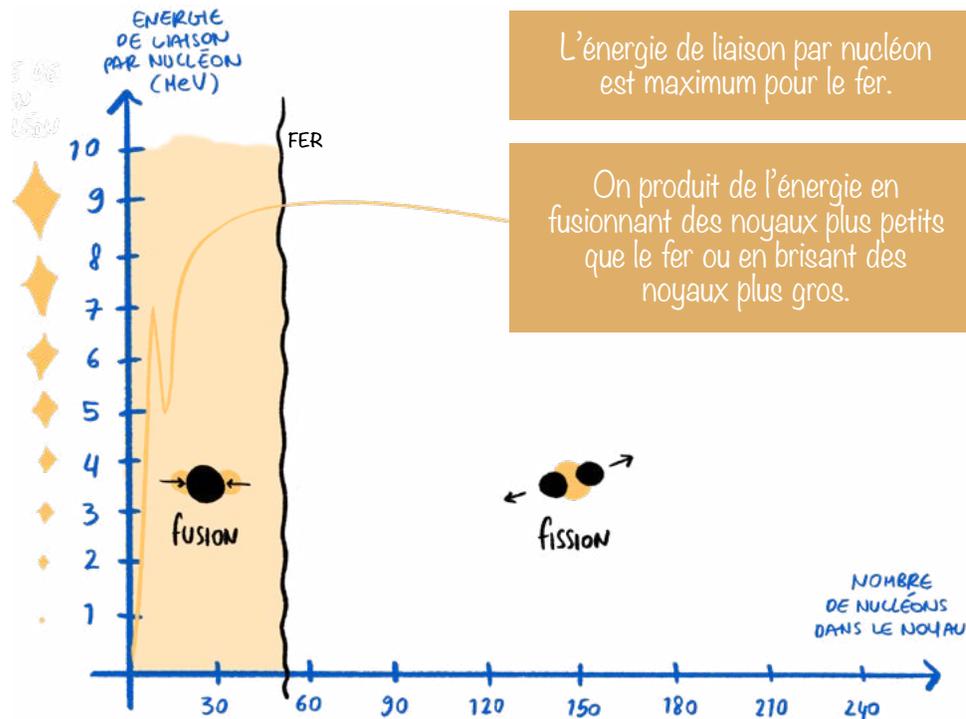


Le noyau d'hélium 4 est constitué de quatre nucléons, deux protons et deux neutrons.

90%
d'atomes d'hydrogène



Le noyau d'hydrogène est constitué d'un unique nucléon, un proton.



Hypothèse: c'est la fusion nucléaire de l'hydrogène en hélium qui est la source d'énergie du Soleil!

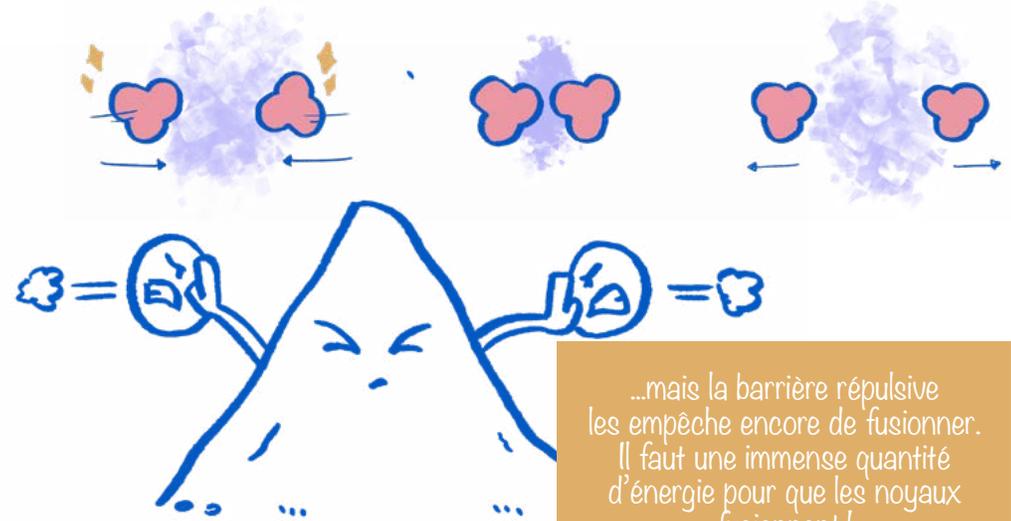
MAIS LES CONDITIONS SONT-ELLES RÉUNIES DANS LE SOLEIL
POUR QUE CETTE FUSION AIT LIEU ?

POUR QUE LES NOYAUX FUSIONNENT, ILS DOIVENT FRANCHIR UN OBSTACLE DE TAILLE.



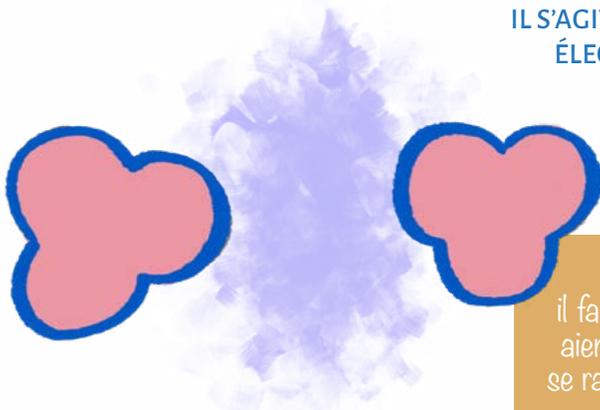
En effet, comme les noyaux ont une charge électrique positive, ils se repoussent.

Lorsque les noyaux ont plus d'énergie, ils arrivent avec une vitesse plus importante...

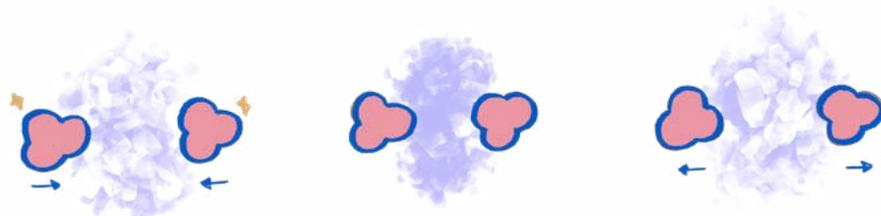


...mais la barrière répulsive les empêche encore de fusionner. Il faut une immense quantité d'énergie pour que les noyaux fusionnent!

IL S'AGIT DE LA RÉPULSION ÉLECTROSTATIQUE!



Pour fusionner, il faut donc que les noyaux aient assez d'énergie pour se rapprocher suffisamment.

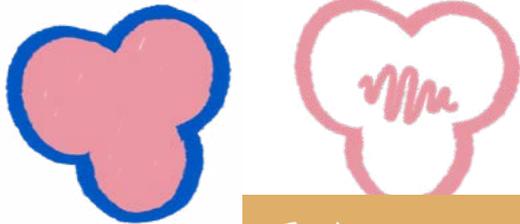


À LA TEMPÉRATURE CENTRALE DU SOLEIL, AUCUN NOYAU NE POSSÈDE L'ÉNERGIE NÉCESSAIRE.



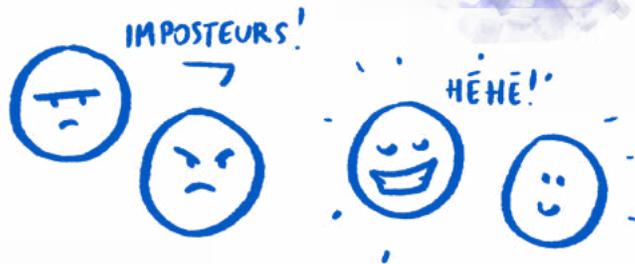
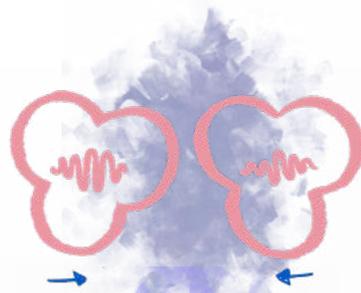
COMMENT LA FUSION A-T-ELLE DONC LIEU ?

C'EST L'EFFET TUNNEL !



En physique quantique, les noyaux sont aussi décrits par des ondes.

Il y a alors une probabilité non nulle pour que des noyaux arrivent à passer la barrière répulsive, même s'ils ne possèdent pas l'énergie suffisante!



GRÂCE À CET « EFFET TUNNEL », LES NOYAUX ARRIVENT À FUSIONNER.



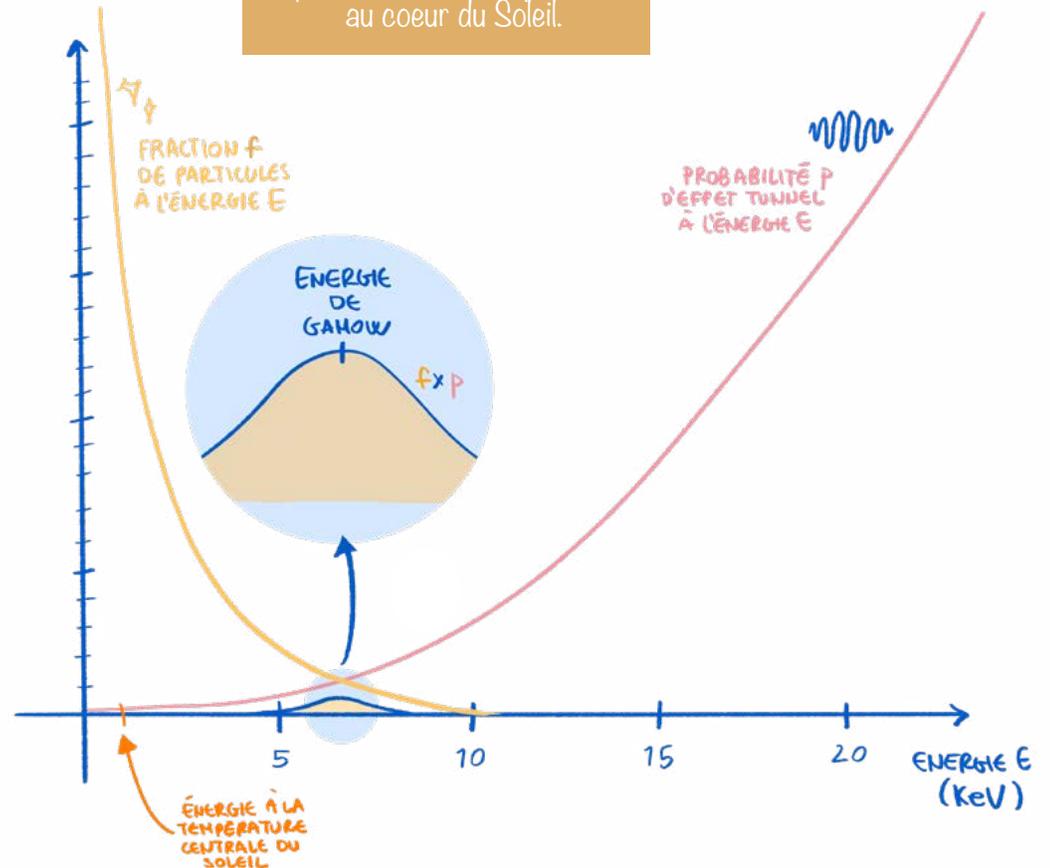
Cependant, seule une petite fraction des noyaux possèdent l'énergie nécessaire pour fusionner ainsi.



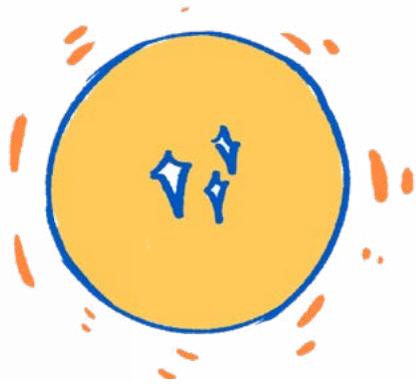
POUR ALLER PLUS LOIN...



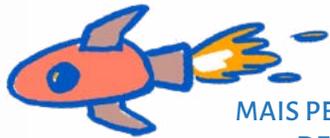
Voici l'énergie optimale pour que l'effet tunnel se produise au coeur du Soleil.



LA QUANTITÉ D'ÉNERGIE NUCLÉAIRE DISPONIBLE DANS LE SOLEIL
LUI PERMET-ELLE DE BRILLER QUELQUES MILLIARDS D'ANNÉES ?



Oui, les calculs montrent
que ça marche !



MAIS PEUT-ON CONFIRMER LA RÉALITÉ
DES RÉACTIONS NUCLÉAIRES
PAR L'OBSERVATION ?

On ne peut bien sûr pas aller au coeur
du Soleil observer les réactions
qui s'y passent !



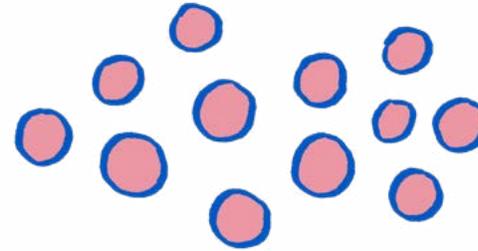
ET SI LES INDICES
VENAIENT À NOUS ?



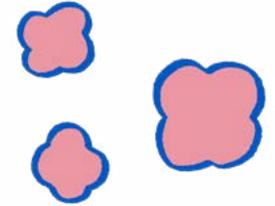
Eh bien c'est le cas grâce
aux neutrinos !

MAIS COMMENT SONT-ILS PRODUITS ?

IL FAUT SE PENCHER EN DÉTAIL SUR LES
RÉACTIONS DE FUSION SE DÉROULANT AU COEUR DU SOLEIL.

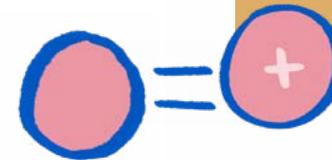


Les noyaux d'hydrogène
fusionnent...



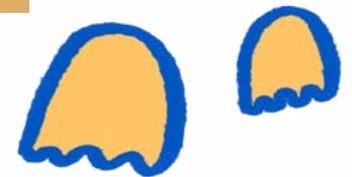
...pour former des noyaux d'hélium.

Le noyau d'hydrogène ne possède
qu'un nucléon, un proton.

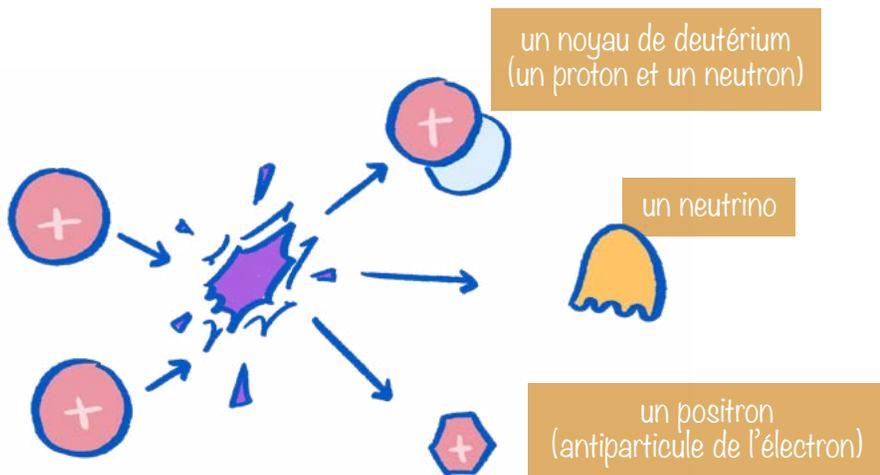


LA FUSION DE L'HYDROGÈNE EN HÉLIUM SE FAIT EN PLUSIEURS ÉTAPES.

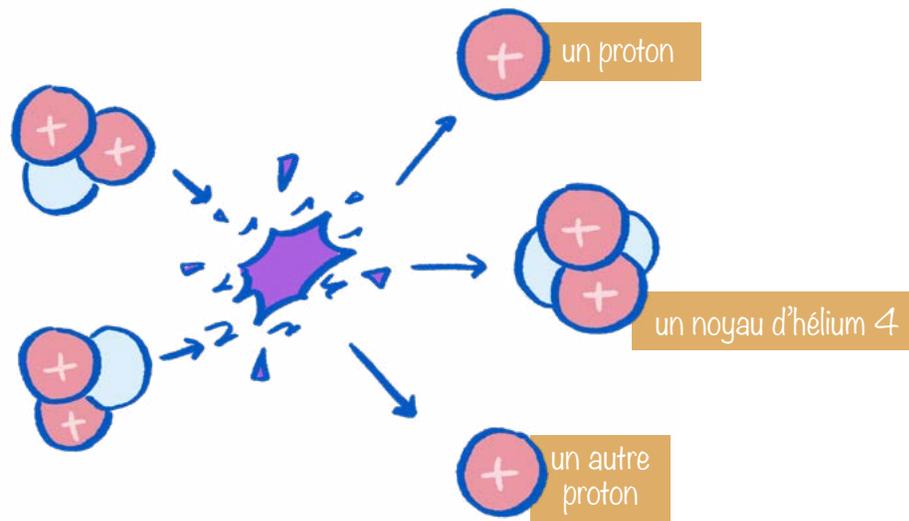
Et au cours de ces réactions,
des neutrinos sont libérés...



QUAND DEUX NOYAUX D'HYDROGÈNE FUSIONNENT, CELA PRODUIT PLUSIEURS PARTICULES :

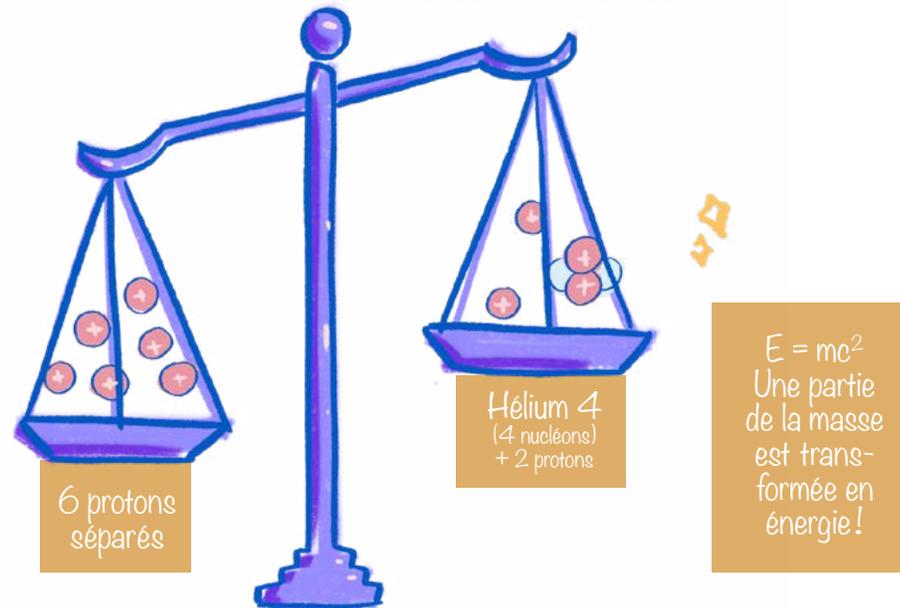
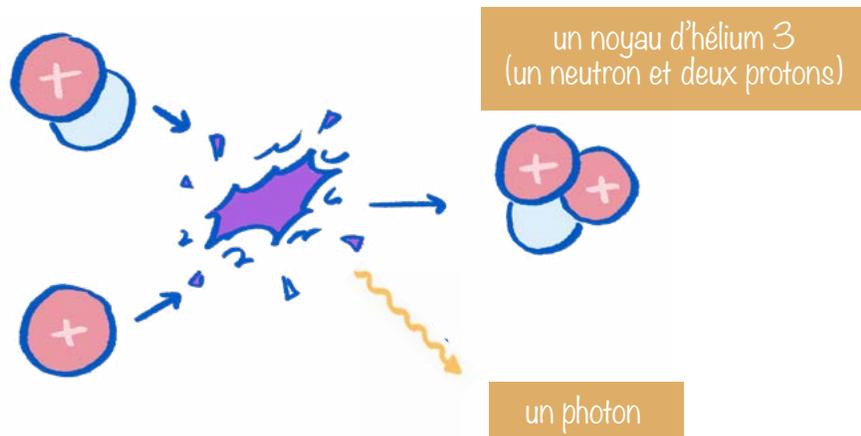


ET QUAND DEUX NOYAUX D'HÉLIUM 3 FUSIONNENT ON OBTIENT...



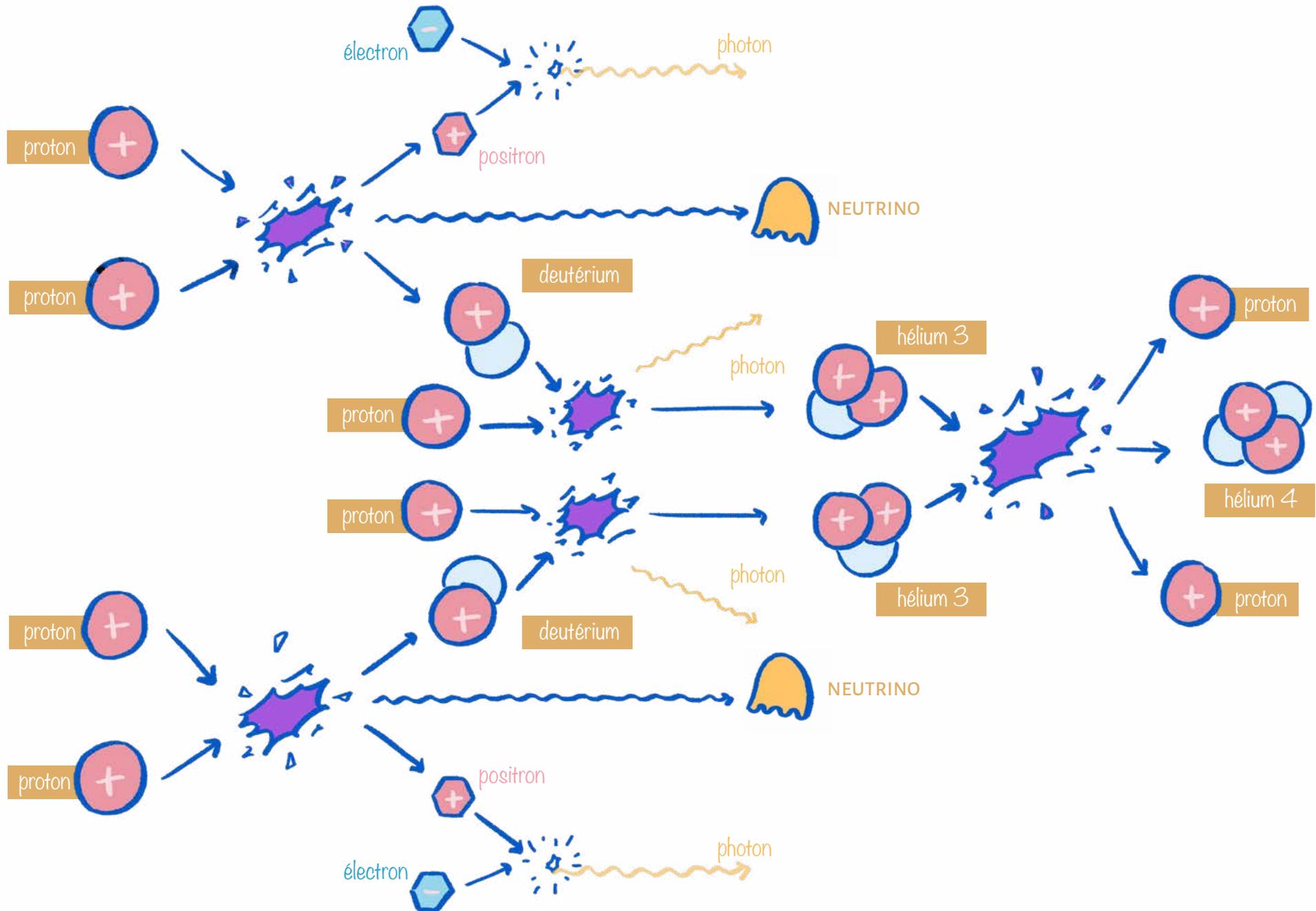
GRÂCE À CES RÉACTIONS, CHAQUE SECONDE, LE SOLEIL TRANSFORME 600 MT D'HYDROGÈNE EN 595 MT D'HÉLIUM 4 !

ENSUITE, CE NOYAU DE DEUTÉRIUM NE S'ARRÊTE PAS LÀ, IL FUSIONNE AVEC UN AUTRE NOYAU D'HYDROGÈNE POUR FORMER...



...LA DIFFÉRENCE ÉTANT CONVERTIE EN ÉNERGIE.

TOUTES CES RÉACTIONS MENANT À L'HÉLIUM 4 SE NOMMENT
LA CHAÎNE PROTON-PROTON !



CE SONT LES NEUTRINOS, PRODUITS LORS DES RÉACTIONS DE FUSION QUI CONFIRMENT LEUR EXISTENCE AU COEUR DU SOLEIL !

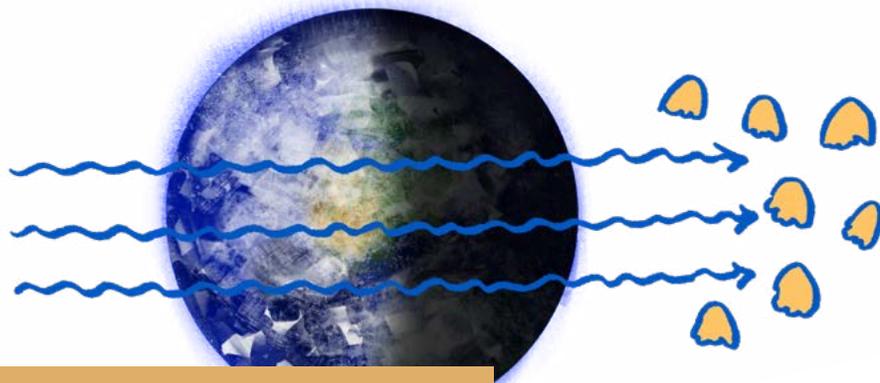


MAIS QUI SONT-ILS ?

ET COMMENT LES DÉTECTER ?



Les neutrinos sont des particules n'interagissant quasiment pas avec la matière.



Ils sortent du Soleil et passent à travers la Terre, sans jamais être déviés. Pour les neutrinos, le Soleil et la Terre sont comme transparents.

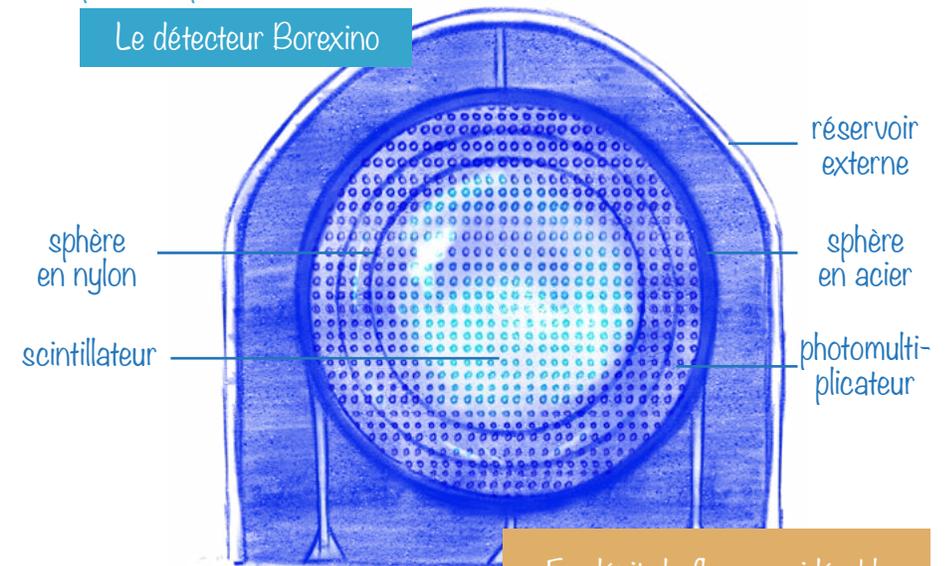
Toutes les secondes, 65 milliards de neutrinos solaires traversent chaque centimètre carré de la Terre!



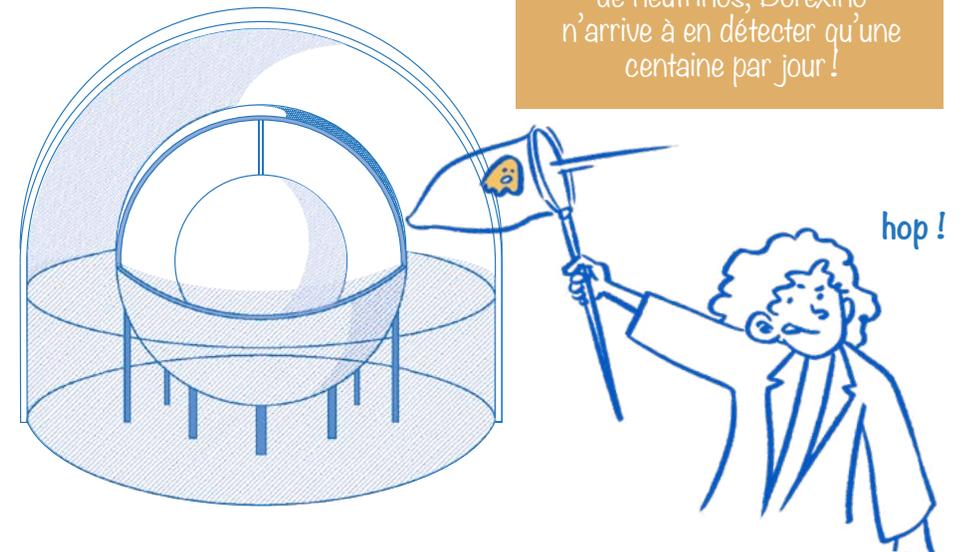
POUR DÉTECTER CES NEUTRINOS, ON DOIT CONSTRUIRE DE GRANDS DÉTECTEURS SPÉCIALISÉS.

par exemple...

Le détecteur Borexino



En dépit du flux considérable de neutrinos, Borexino n'arrive à en détecter qu'une centaine par jour!



C'est ainsi qu'on a pu confirmer l'origine nucléaire de l'énergie permettant au Soleil de briller depuis des milliards d'années !



Conception graphique & Illustration
JUDITH LORNE

Supervisé par
ROLAND LEHOUCQ
(CEA)

Typographies
ALEGREYA SANS
NOTEWORTHY

Impression
ÉCOLE ESTIENNE

