

Le rayonnement solaire est aussi indispensable à la vie des Terriens qu'il peut être dangereux pour leur santé, en cas d'excès d'exposition ou de défaillance des mécanismes naturels de protection et de réparation.

Le Soleil, indispensable mais dangereux ami

Au cœur du Soleil, des **réactions thermonucléaires de fusion** de l'**hydrogène** en **hélium** provoquent la formation de la **couronne solaire** et une émission constante de différents types de **rayonnements**. Après environ huit minutes de voyage, ces derniers rencontrent la **magnétosphère**, le bouclier formé par le champ magnétique terrestre qui protège notre planète des particules **ionisées** du **vent solaire**. Lors de la traversée de l'atmosphère, une partie des rayonnements électromagnétiques est ensuite absorbée par les gaz qui la composent (oxygène, azote, gaz carbonique, ozone) ou par les nuages. Seule une fraction du spectre solaire arrive à la surface de la Terre et nous atteint : elle est constituée de trois types de rayonnements électromagnétiques : les **infrarouges**, aux longueurs d'onde comprises entre 780 et 3000 nanomètres (nm), les **visibles**, entre 400 et 780 nm, et les **ultraviolets** (UV), entre 100 et 400 nm (figure 1).

Des effets positifs pour l'homme, à dose limitée

Présents bien avant l'apparition de la vie sur Terre, les rayonnements solaires ont permis la sélection des organismes dotés de différents systèmes cellulaires et moléculaires capables, d'une part, d'utiliser au mieux leur énergie et, d'autre part, d'éliminer les dommages qu'ils induisent. Une exposition à durée limitée a de nombreux effets bénéfiques pour notre santé. La synthèse cutanée de vitamine D est favorisée par les ultraviolets, permettant une concentration de calcium adéquate et la formation correcte du tissu osseux. Elle a contribué de façon importante à l'évolution des vertébrés. De plus, les rayonnements solaires sont de loin le signal externe le plus déterminant pour l'alternance veille-sommeil, parmi d'autres rythmes journaliers.

En parallèle, des organes protecteurs comme la peau et plusieurs systèmes très efficaces de protection chimique (**équilibre redox** et molécules capables de piéger les radicaux dangereux) et biochimique (**protéines** et **enzymes** du **métabolisme** et de la réparation de l'**ADN**) ont été sélectionnés pour faire face aux dommages produits par le métabolisme cellulaire et par des agents de nature chimique ou physique de l'environnement comme les rayonnements solaires.

Malgré ces mécanismes de défense très sophistiqués, la surexposition volontaire ou accidentelle à ces rayonnements peut avoir de lourdes conséquences pour tout

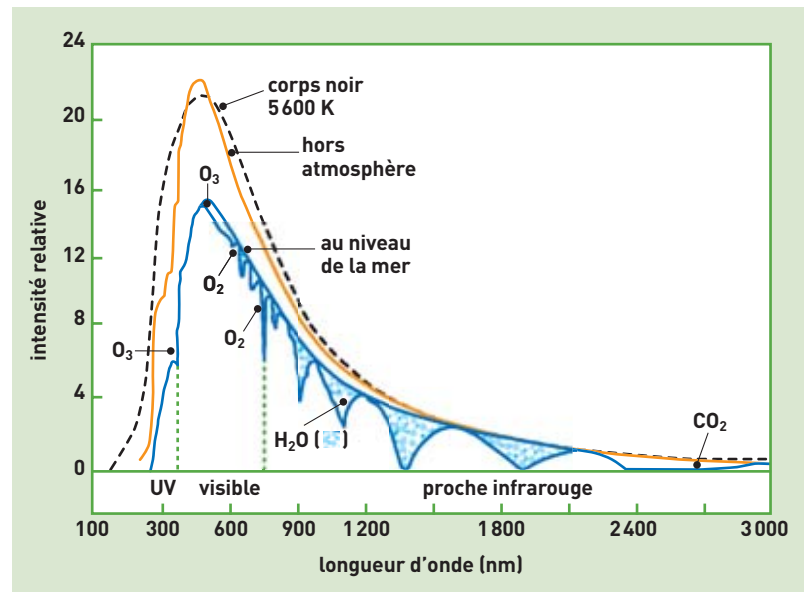
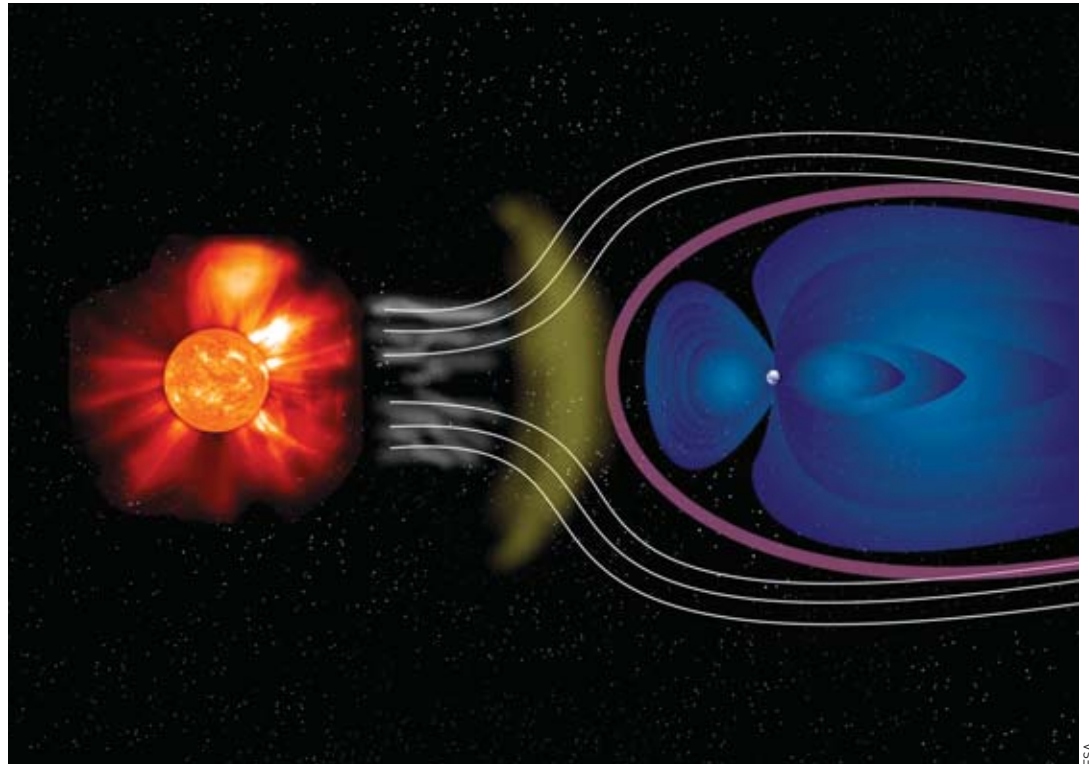
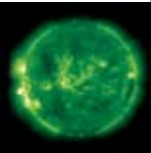


Figure 1. Spectre des rayonnements électromagnétiques solaires arrivant sur la surface de la Terre. Comparaison entre les rayonnements avant pénétration dans l'atmosphère et au niveau de la mer (O₃ indique l'absorption des rayonnements UV ou visibles par l'ozone, H₂O par l'eau et CO₂ par le dioxyde de carbone).

l'organisme. La composante ultraviolette de la lumière solaire est en effet le **cancérigène** le plus répandu de notre environnement (figure 2). James Cleaver a remarqué pour la première fois, en 1968, que les cellules provenant de la peau de malades souffrant de *xeroderma pigmentosum* (xp) étaient incapables de réparer les lésions provoquées par les rayonnements ultraviolets. C'était la première association d'une maladie humaine à un mécanisme défectueux de réparation de l'ADN. Par la suite, de nombreuses observations ont confirmé et élargi les connaissances sur la réponse des cellules humaines aux dommages produits par une grande variété d'agents chimiques et physiques, en particulier dans les cellules de patients atteints de maladies associées à des anomalies chromosomiques ou avec une grande **incidence** de cancer.

La peau et les yeux, principales interfaces entre l'organisme et le rayonnement solaire

Les 2 m² de la peau humaine jouent un rôle important comme barrière de protection face à l'environnement. De plus, la peau est impliquée dans la réponse immunitaire, le contrôle de la température du corps



La magnétosphère de la Terre (lignes bleues) protège la planète des particules ionisées qui constituent le vent solaire (lignes blanches).

ESA

et la réception de divers signaux externes. Le renouvellement continu de ses différentes couches lui permet d'assurer ses fonctions d'organe vital. Les rayonnements solaires affectent différemment ces couches avec des effets variables selon la quantité d'énergie déposée (figure 3).

La deuxième cible, l'œil humain, est particulièrement réceptive aux rayonnements solaires d'une longueur d'onde comprise entre 400 et 780 nm et de ce fait appelés rayonnements visibles. Les rayonnements UV, invisibles pour l'œil, peuvent être particulièrement dangereux.

Pathologies associées aux excès de rayonnement solaire

Personne n'est à l'abri des maladies des yeux causées par les rayonnements. En effet, l'exposition chro-

nique à des doses importantes d'UV sans protection peut, à la longue, conduire à la cécité. Plus de 99% des rayonnements UV sont absorbés par les structures antérieures de l'œil. Très peu arrivent à la rétine sensible à la lumière (figure 4). Bien que la composante UV des rayonnements solaires soit inutile pour la vision humaine, il est vraisemblable que les UV absorbés par les yeux contribuent aux changements relatifs au vieillissement et à un certain nombre de maladies typiques comme les cataractes (opalescence du cristallin), première cause de cécité dans le monde. L'organisation mondiale de la santé (OMS) estime que 20% des 20 millions de cas de cécité par cataracte seraient dus au Soleil, les pays les plus affectés étant ceux situés le long de l'équateur. En France, 100 000 nouveaux cas annuels pourraient être dus aux ultraviolets. La protection, surtout chez les enfants (casquettes et lunettes de soleil) est indispensable

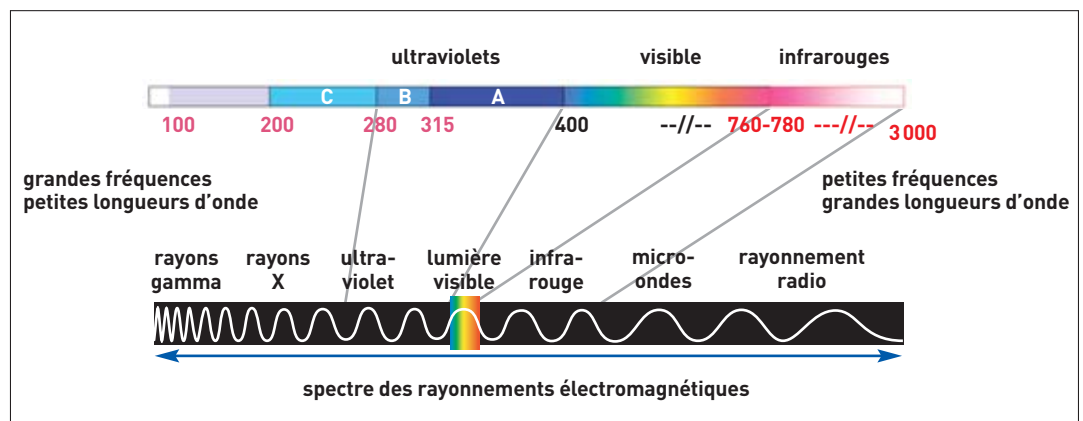


Figure 2. Les rayonnements solaires ne sont qu'une partie des différents types de rayonnements électromagnétiques qui entourent l'homme à tout moment dans sa vie quotidienne, depuis les rayons cosmiques et les rayons X des radiographies dans les hautes fréquences du spectre jusqu'aux micro-ondes des fours et les ondes courtes de la radio dans les basses fréquences.

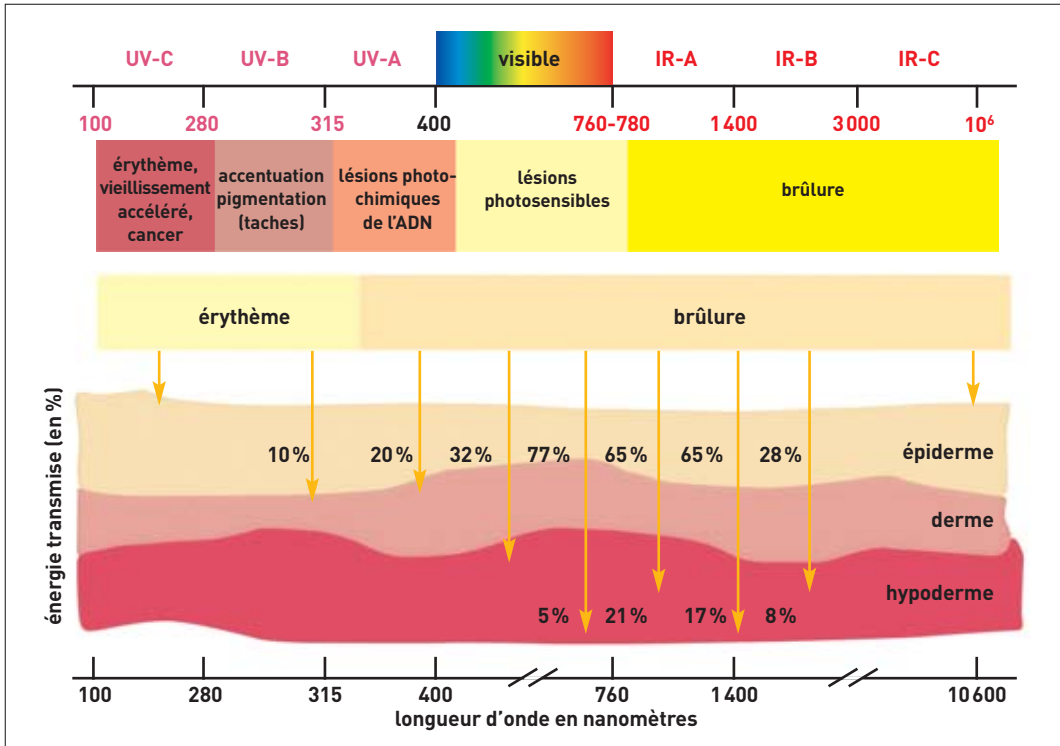


Figure 3. Effets des rayonnements solaires sur les différentes couches de la peau humaine en fonction des différentes régions spectrales.

pour prévenir ces effets. Ce type de mesure simple peut aussi aider à la prévention du cancer de la peau, dont 80 000 nouveaux cas apparaîtraient chaque année en France. Le mélanome malin, induit par les ultraviolets, est une des formes de cancer les plus redoutables et une des plus couramment diagnostiquées. Il était responsable de 666 décès en 1980 et de 4825 en 2000. Ces effets ont conduit à fixer la *limite de dose pour l'exposition professionnelle journalière* aux rayons ultraviolets incidents sur la peau ou l'œil à 30 J/m² efficaces. Cette dose correspond au dixième de la dose moyenne causant un érythème chez les sujets caucasiens⁽¹⁾. L'érythème, ou "coup de soleil", est le principal signe clinique d'une exposition prolongée aux ultraviolets. Cette brûlure se produit après une exposition de 10 minutes à 6 heures selon l'altitude, l'heure du jour et d'autres paramètres comme l'épaisseur de la couche d'ozone, la couverture nuageuse et la sensibilité inhérente à chaque type de peau. Une personne ayant une peau très claire (correspondant au phototype I⁽²⁾) présente un léger coup de soleil après seulement 10 minutes d'exposition en plein soleil alors qu'une personne de phototype IV peut s'exposer une heure sans rougir.

Pourquoi les rayonnements solaires peuvent-ils être si dangereux ?

Les rayonnements UV apportent de l'énergie aux molécules composant nos cellules, modifiant leur composition chimique. Les différentes altérations ainsi créées activent toute une série de voies métaboliques destinées à neutraliser ces dommages moléculaires.

(1) Caucasiens : type ethnique correspondant aux individus de type européen à la peau blanche.

(2) Phototype : néologisme désignant les caractères d'un individu et de sa peau vis-à-vis de la lumière. Il existe quatre grands phototypes qui dépendent principalement de la pigmentation de la peau par la mélanine et de la densité des mélanocytes.

Les conséquences les plus graves sont les modifications de l'ADN, molécule qui véhicule toutes les informations nécessaires à la vie des cellules et de l'individu. Les ultraviolets créent des liaisons nouvelles entre des pyrimidines adjacentes qui se trouvent normalement dans sa structure (figures 5 et 6). Ces changements presque imperceptibles peuvent avoir des conséquences considérables pour la cellule, conduire dans certains cas à sa destruction ou, dans d'autres cas, générer des cellules cancéreuses. Fort heureusement, nous disposons de plusieurs systèmes capables de réparer ces lésions avec une précision remarquable. Le principal mécanisme mis en jeu permet de reconnaître et d'exciser le fragment d'ADN contenant le dimère de pyrimidine, puis de le resynthétiser correctement. Cette voie de réparation appelée réparation par excision de nucléotides lésés et resynthèse (système NER, pour

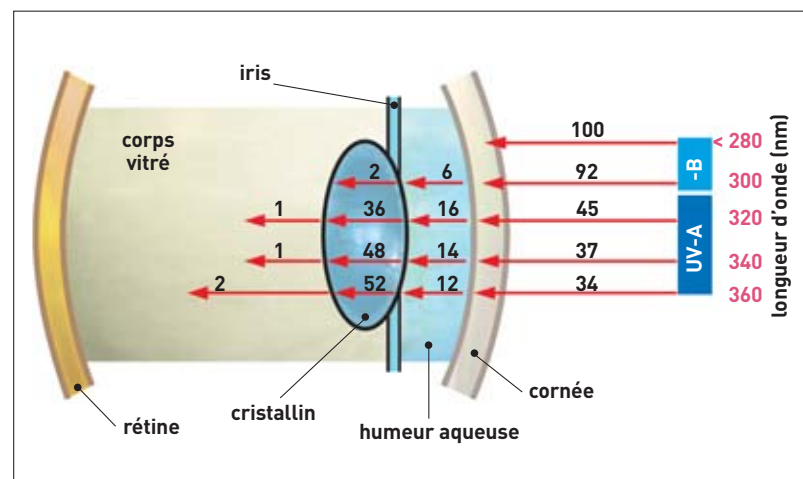


Figure 4. Absorption des rayonnements solaires par les différents composants de l'œil. Les chiffres indiquent, pour les longueurs d'onde des rayonnements ultraviolets, les pourcentages d'énergie absorbés par ces constituants.

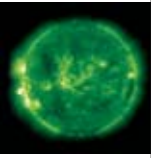
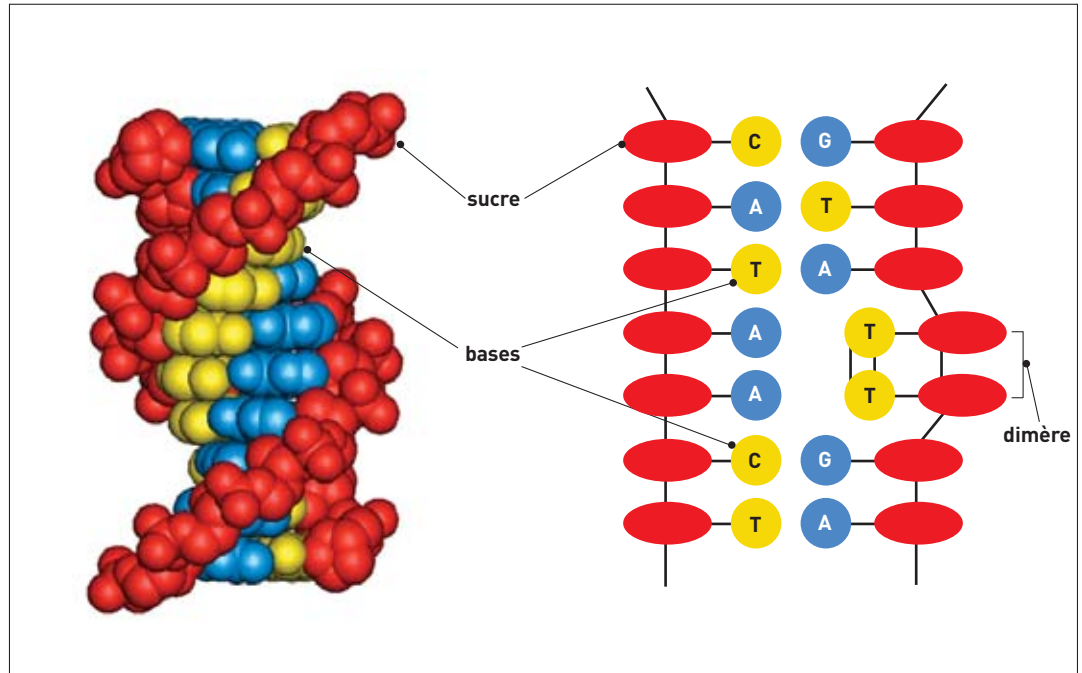


Figure 5. Représentation de la déformation de la structure de l'ADN provoquée par les rayonnements ultraviolets. Les dimères de thymine ainsi formés peuvent générer des mutations dans le matériel génétique avec de lourdes conséquences pour l'individu.



séquence bipyrimidique T-T

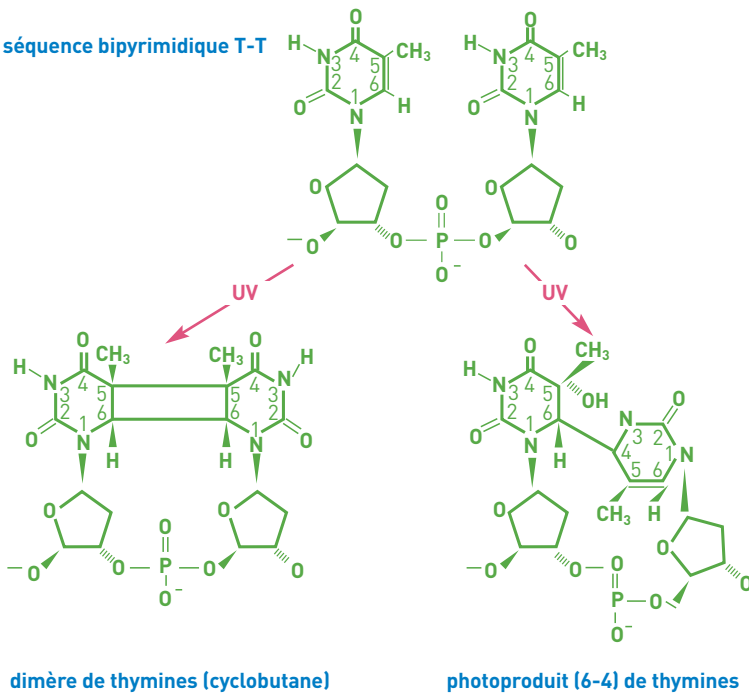


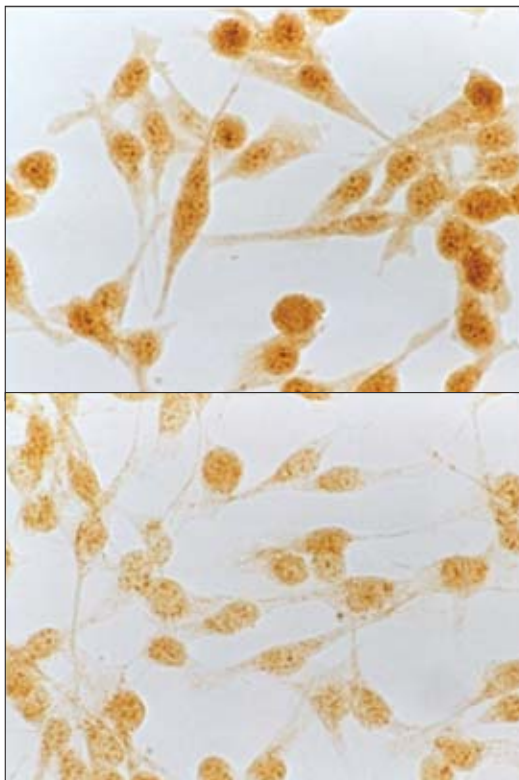
Figure 6. Exemples de structures de dimères de thymine générés par les rayonnements solaires.

nucleotide excision repair) s'est remarquablement conservée au cours de l'évolution, de la bactérie à l'homme (figure 7, p. 100).

Les conséquences biologiques des failles du système NER

La caractérisation moléculaire de cette voie a montré qu'elle est à la base de la protection contre la cancérogenèse imputable aux rayonnements solaires. Chez l'homme, parmi tous les systèmes de réparation iden-

tifiés à ce jour, le système NER joue un rôle central en raison de son ample spectre de reconnaissance des dommages. Il est composé de deux voies majeures : le *NER global* du **génom**e, système de surveillance de la présence des distorsions dans la totalité de la molécule d'ADN, et le *NER couplé à la transcription*, qui élimine spécifiquement les dommages de l'ADN qui bloquent l'élongation des **ARN transcrits** par les **ARN polymérases**. Le système NER est la principale défense contre les effets **génétoxic** du rayonnement solaire, mais aussi d'une grande quantité de substances chimiques cancérogènes. Dans certaines maladies héréditaires provoquant une grande susceptibilité au rayonnement solaire, des **mutations** qui inactivent des protéines impliquées dans le système NER sont systématiquement rencontrées. Trois pathologies principales sont liées à des défauts dans les **gènes** du système : le *xeroderma pigmentosum* (xp), le syndrome de Cockayne et la trichothiodystrophie (TTD). Tous les malades présentent une déficience dans la réparation de l'ADN et, dans le cas particulier du syndrome xp, l'hypersensibilité au soleil accompagnée d'une incidence des cancers de la peau chez ces malades 1 000 fois supérieure à celle des individus normaux. Cette maladie est présente partout mais son incidence peut varier de 1 cas sur 250 000 personnes en Europe et aux États-Unis jusqu'à 1 sur 40 000 au Japon. Les malades présentent une peau anormalement parcheminée, squameuse et pigmentée, des atteintes particulières du tissu oculaire (paupières, conjonctive et cornée), ainsi que des problèmes neurologiques. Ils développent un cancer de la peau en moyenne dès l'âge de 8 ans, 50 ans plus tôt que la population des États-Unis en général. Chez eux, le système NER est partiellement ou totalement inactivé. Au niveau moléculaire, cela se traduit par l'altération de protéines participant au complexe NER comme la protéine XPC capable de reconnaître les lésions de l'ADN ou la protéine XPA participant à l'association des autres protéi-



CEA

L'introduction du gène XPC normal dans des cellules des malades xp sensibles aux rayonnements solaires leur permet de récupérer la capacité à réparer l'ADN et de répondre à l'irradiation aux ultraviolets par l'activation d'un système de type SOS. Le nombre et l'intensité de la coloration des foyers intranucléaires augmentent dans les cellules irradiées (en haut) par rapport aux cellules non irradiées (en bas) indiquant l'accumulation de la protéine kin17, protéine de réponse aux rayonnements qui fait partie du complexe de réplication de l'ADN.

nes du complexe. Des modifications dans la structure de ces protéines peuvent bloquer la reconnaissance des lésions ou empêcher la formation du complexe de réparation. De ce fait, les dimères de pyrimidine aberrants subsistent et diminuent la fidélité du processus de **réplication** de l'ADN, conduisant à la formation des mutations. Ce processus peut aboutir à l'inactivation de certains gènes qui assurent la stabilité du génome et provoquer un effet "boule de neige". À long terme, ceci conduit à une augmentation constante du nombre des mutations produites et au cancer. C'est cette mutagenèse exacerbée des cellules cancéreuses qui est à la base de l'évolution génétique permettant la progression tumorale.

Réponse cellulaire aux rayonnements solaires

Une responsabilité majeure du CEA concerne la maîtrise des effets des rayonnements ionisants sur l'homme. C'est pourquoi les pouvoirs publics lui ont confié la mission de caractériser les mécanismes d'action des rayonnements sur l'ADN, les cellules et les tissus. Ces connaissances doivent permettre d'évaluer précisément et scientifiquement les risques liés à l'industrie nucléaire. Au Département de radiobiologie et radiopathologie, à Fontenay-aux-Roses, le laboratoire de génétique de la radiosensibilité a en charge d'identifier et de caracté-

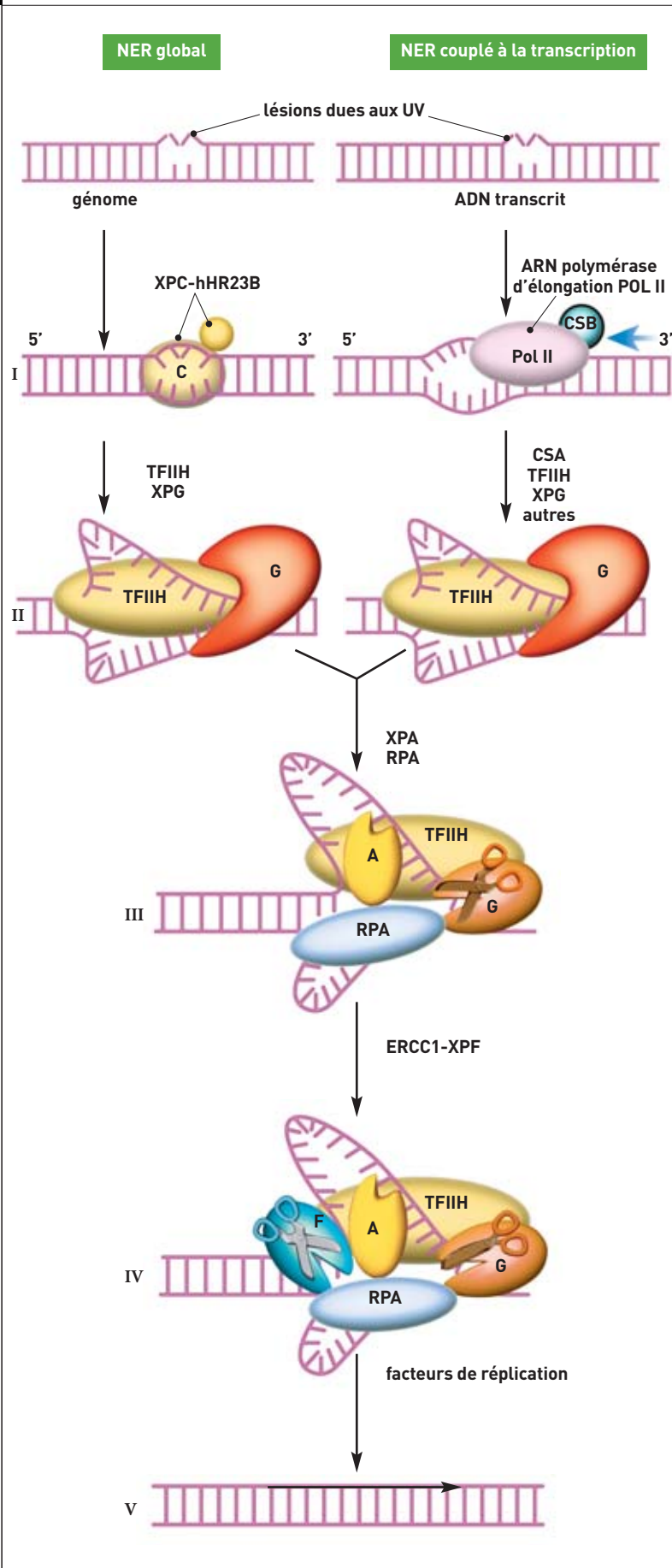
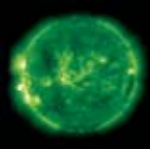
ser les gènes du métabolisme de l'ADN impliqués dans la radiosensibilité cellulaire et de préciser les effets biologiques produits par l'inactivation des gènes de réparation de l'ADN. Cette recherche fondamentale fait appel à des approches expérimentales complémentaires, *in vivo* chez l'homme et chez les rongeurs, *ex vivo* dans des cultures cellulaires, et caractérise les mécanismes moléculaires de la réplication et de la réparation du matériel génétique. Autant de connaissances qui sont primordiales pour comprendre les bases moléculaires de la mutagenèse et prédire une éventuelle évolution vers la cancérogenèse.

Paradoxalement, la toute première réponse aux rayonnements UV, non ionisants, semble indépendante du système de réparation de l'ADN qui sera ultérieurement mis en œuvre. Que le système NER soit déficient ou non, l'irradiation des cellules provoque de manière similaire l'accumulation de la protéine p53, gardienne du génome, ainsi que l'**activation** massive de nombreux gènes et protéines de la réponse aux ultraviolets, comme l'ont confirmé de nombreuses équipes dans le monde. Les chercheurs du CEA ont donc été amenés à postuler que, en dehors de leur incapacité à réparer l'ADN, les cellules des malades xp sont aussi affectées dans d'autres voies métaboliques importantes pour la formation des cancers.

Une nouvelle voie de signalisation des dommages radio-induits identifiée

En étroite collaboration avec le Dr Alain Sarasin (Institut Gustave Roussy, Villejuif), ils ont analysé les différences qui existent entre l'**expression** des gènes dans des cellules provenant de malades xp et de donneurs normaux. Un gène appelé *KIN17* a ainsi été identifié, codant pour une protéine du complexe de réplication de l'ADN. Son expression est augmentée 16 heures après irradiation par les UV. Fait intéressant, ce phénomène est diminué, voire inexistant, dans certaines cellules provenant des malades xp. Conservé de la levure à l'homme, le gène *KIN17* code pour une protéine de la famille dite "à doigt de zinc", localisée dans certaines zones du noyau cellulaire. Une fraction de cette protéine est associée à l'ADN chromosomique et fait partie d'un complexe de haut poids moléculaire essentiel pour sa réplication. L'expression de ce gène augmente après une irradiation ionisante ou ultraviolette.

En revanche, d'autres gènes de la réponse aux rayonnements ont une expression augmentée après exposition aux UV dans les cellules xp, quel que soit le statut du système de réparation NER (**figure 7**). Les fibroblastes primaires de malades xp, déficients pour les protéines XPA ou XPC, sont incapables d'activer le gène *KIN17* après exposition aux UV. Cependant, cette incapacité disparaît dès lors que l'ADN du gène XPC normal est introduit dans ces fibroblastes primaires (lignées établies à partir d'une métastase d'un malade xp). Ces cellules "complémentées pour XPC" récupèrent un système de réparation NER fonctionnel et un taux de survie normal après irradiation aux UV. La détection de la protéine kin17 révèle que les cellules complémentées pour la protéine XPC présentent une augmentation et une relocalisation nucléoplasmique de cette protéine similaire à celle observée dans les cellules



normales. Les protéines XPA ou XPC, en dehors de leur rôle dans le système de réparation NER, participent donc à une voie de signalisation des dommages aboutissant notamment à l'augmentation de l'expression de certains gènes, dont *KIN17*. Ce modèle cellulaire permet ainsi de préciser l'importance de cette voie de signalisation dans le développement de tumeurs radio-induites et aussi d'évaluer la contribution de cette réponse aux rayonnements dans la prévention de la cancérogenèse.

> Jaime F. Angulo
 Direction des sciences du vivant
 CEA centre de Fontenay-aux-Roses

Figure 7. Modèle du mécanisme de réparation de l'ADN par excision des nucléotides et resynthèse (NER) selon Hoeijmakers, *Nature*, 2001, vol. 411, pp. 366-374 (avec l'autorisation de *Nature*).

A Toute la lumière sur le Soleil

Plus gros objet du système solaire, le Soleil représente environ 99,8% de sa masse totale. Composé initialement de plus de 70% d'**hydrogène** et plus de 25% d'**hélium**, le Soleil est une gigantesque boule de gaz chaud tournant sur elle-même.

La **structure interne du Soleil** est divisée en quatre régions (figure). Le **cœur**, où les conditions de température et de densité sont extrêmes, est le siège de nombreuses réactions nucléaires qui transforment l'hydrogène en hélium. L'énergie libérée se retrouvera sous la forme de **lumière visible** au niveau de la surface.

Dans la **zone radiative**, qui s'étend du cœur à 0,71 rayon solaire, l'énergie est transportée vers la surface du Soleil par l'interaction **photons-matière** (transport radiatif). Les photons sont absorbés et réémis des millions de fois dans de multiples collisions avec les **atomes** rencontrés qui sont très **ionisés**. Il faut plus d'un million d'années pour que les photons atteignent la **tachocline**, fine couche de transition entre la zone radiative et la zone convective et qui joue un rôle essentiel dans le **champ magnétique** solaire.

Dans la **zone convective**, du fait de la diminution de température, le milieu formé d'atomes partiellement ionisés et d'atomes neutres est plus opaque. La progression des photons devient difficile. De plus, la densité y varie d'un facteur un million entre la base et la surface. Ces forts gradients de température et de densité engendrent des mouvements **convectifs** qui sont observables à la surface comme des **granules** (leur durée de vie se chiffre en minutes) ou des **supergranules** dont les dimensions sont respectivement de l'ordre de 1 000 km et 35 000 km.

L'**atmosphère solaire** comporte quatre régions (figure). La surface, ou **photosphère**, épaisse de seulement 400 km et dont la température est proche de 5 800 K, présente donc un aspect granuleux et des zones plus ou moins sombres. Des zones obscures ou **taches solaires**, qui sont isolées ou en groupe, sont à une température de 3 800 K. Elles apparaissent noires du fait de leur différence de température avec les régions avoi-

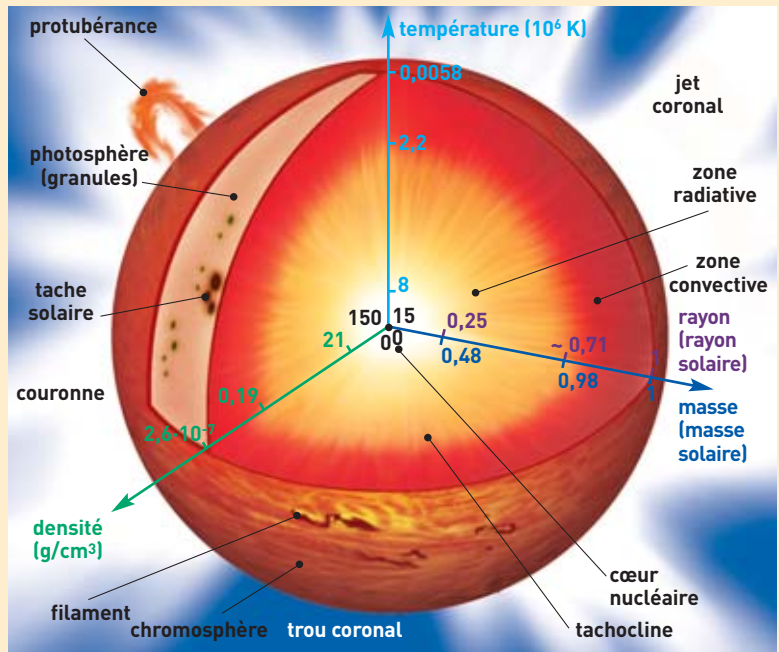


Figure.

sinantes. Elles sont soumises à un **cycle** de 11 ans et sont associées à des régions dont le champ magnétique est beaucoup plus intense (quelques milliers de gauss) que sur l'ensemble du Soleil (1 gauss). Ces taches peuvent atteindre un diamètre de 50 000 km. Leur durée varie de quelques jours à plusieurs mois. Des zones plus claires et plus chaudes ou **facules**, parfois isolées mais généralement situées autour d'un groupe de taches, sont également observées.

Au-delà de la photosphère, s'étendant sur des milliers de kilomètres, se trouve la **chromosphère**, dont la densité continue à décroître rapidement alors que la température atteint 20 000 K. Dans cette zone se trouvent les **plages**, régions brillantes caractérisant les forts champs magnétiques des taches solaires, les **protubérances** ou **filaments** (lorsqu'elles sont vues sur le **disque** solaire), structures magnétiques plus denses et plus froides (10 000 K) que leur environnement, et les **spicules**, petits jets de matière à vie courte (5 à 10 minutes) se dirigeant vers la couronne à une vitesse de près de 20 km/s.

Entre la chromosphère et la couronne se situe la **région de transition**, couche mince et irrégulière dans laquelle la température augmente brutalement.

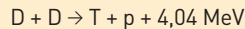
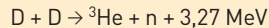
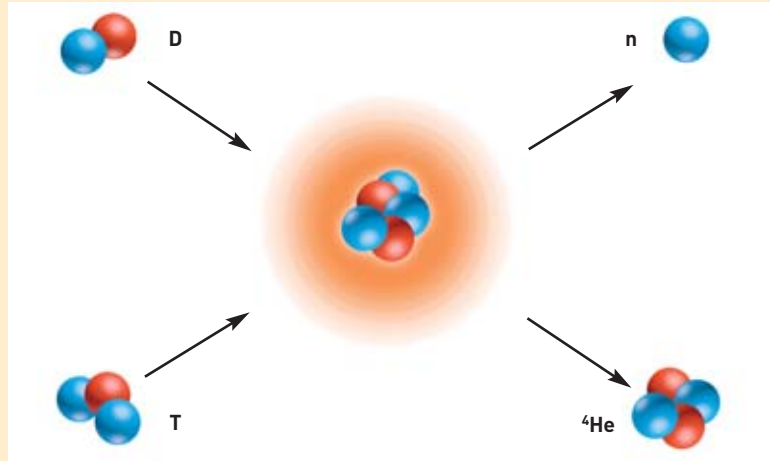
La **couronne**, peu riche en gaz, s'étend sur des millions de kilomètres et est caractérisée par une température de plus de 1 500 000 K et une densité faible. Elle comporte de nombreuses structures magnétiques ou associées à des structures magnétiques telles que les **boucles coronales**, les **trous coronaux**, les **points brillants**... Dans cette région en perpétuelle évolution apparaissent les protubérances ou filaments, sous la forme de grands **panaches** de gaz chauds, provenant de la chromosphère. L'activité solaire n'est pas constante. Régulièrement, avec une intensité cyclique, des **éruptions** violentes se produisent dans les **régions actives**. Il s'agit de brusques libérations de particules de haute énergie dans le milieu interplanétaire. Ces **éjections de masse coronale** (CME) atteignent parfois 100 000 km de haut et 200 000 km de long. Suivant la direction d'éjection, les particules de haute énergie émises peuvent interagir avec l'atmosphère terrestre.

Le Soleil expulse également un flux permanent de particules chargées, principalement des **protons** et des **électrons** formant un **plasma**, appelé **vent solaire**. Celui-ci se propage hors du système solaire à une vitesse d'environ 450 km/s. Le Soleil perd environ un cent millième de milliardième de sa masse par an.

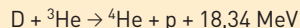
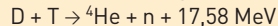
D Les réactions de fusion nucléaire

Pour obtenir la **fusion** de deux **noyaux** atomiques légers, il faut les rapprocher tout près l'un de l'autre alors qu'ils se repoussent naturellement, portant tous deux une charge électrique positive. Si l'on veut récupérer l'énergie libérée par cette fusion, il faut donc d'abord fournir celle nécessaire pour franchir cette barrière et permettre à chaque noyau d'arriver dans la zone, très proche de l'autre, où se manifestent les forces nucléaires capables de vaincre cette répulsion électrostatique ou **barrière coulombienne**. Une fois ce résultat obtenu, les réactions les plus énergétiques sont celles qui aboutissent au noyau fusionné dont l'énergie de liaison est la plus élevée. C'est en l'occurrence le cas de l'**isotope** ${}^4\text{He}$ de l'hélium, qui possède quatre **nucléons** (deux **protons** p et deux **neutrons** n).

Parmi les réactions de fusion qui produisent de l'énergie en même temps qu'elles génèrent, d'une part, un nouveau noyau, noyau d'**hélium** (He) ou de **tritium** (T), et d'autre part un **nucléon**, quatre sont *a priori* particulièrement intéressantes*. Les deux premières sont séduisantes parce qu'elles n'impliquent que du **deutérium** (D); l'isotope de l'**hydrogène** le plus abondant sur Terre. Leur maîtrise peut constituer le but ultime de la fusion contrôlée, mais elles sont, de loin, les plus difficiles à réaliser.

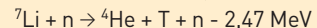
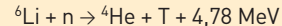


Les deux suivantes, formant le noyau très stable de l'hélium 4, sont particulièrement énergétiques :



La réaction de fusion la plus facile à réaliser, car présentant la **section efficace** la plus élevée, est celle impliquant un noyau de deutérium (D) et un noyau de tritium (T), fusion qui donne un noyau d'hélium et un neutron dont l'énergie est respectivement de 3,5 MeV et de 14,1 MeV. C'est donc sur elle, appelée D-T, que se concentrent les recherches sur la fusion contrôlée, aussi bien pour la **fusion à confinement inertiel** que

pour la **fusion à confinement magnétique**. La production du tritium nécessaire est assurée par une cinquième réaction mettant en jeu le **lithium** et... les neutrons de la réaction D-T.



Les combustibles primaires, c'est-à-dire les véritables matières premières d'un réacteur, sont donc le deutérium et le lithium (Li).

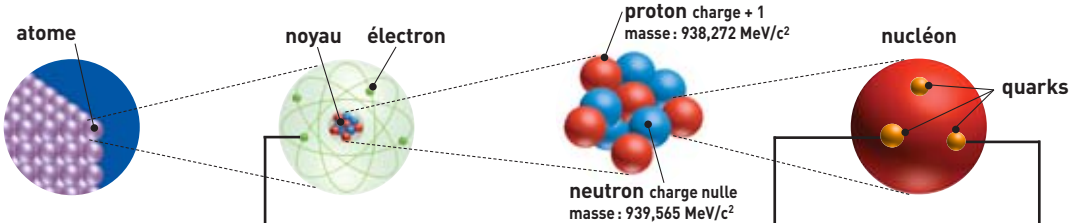
*Ces réactions sont dites *thermonucléaires* parce que seule une température de l'ordre d'une centaine de millions de degrés, en même temps que d'autres conditions de densité et de temps de confinement (cf. texte principal), permet de les obtenir. Voir en p. 8 le tableau des principales réactions nucléaires qui ont lieu dans le Soleil.

C Particules élémentaires et interactions fondamentales

Les **neutrinos** sont les plus furtives des particules du **modèle standard de la physique des particules**, cadre théorique qui décrit toutes les **particules élémentaires** connues et les **interactions fondamentales** auxquelles elles participent (tableau).

Les constituants élémentaires de la matière, les **fermions**, se partagent en deux grandes catégories, les **leptons** qui ne répondent pas à l'**interaction forte**, et les **quarks** qui subissent toutes les interactions. Les six quarks forment trois paires (bas/haut, étrange/

charmé et beauté/top). Dans la catégorie des leptons, les **leptons chargés** (**électron** e^- , **muon** μ , **tau** τ) participent à l'**interaction électromagnétique** et à l'**interaction faible** et les **leptons neutres** (**neutrino électronique** ν_e , **neutrino muonique** ν_μ , **neutrino tauique** ν_τ) ne




	leptons peuvent se déplacer librement		quarks prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement	
Fermions La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe.	première famille électron responsable de l'électricité et des réactions chimiques sa charge est -1 masse : 0,511 MeV/c ²	neutrino électronique sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant	bas sa charge électrique est -1/3 le proton en contient un, le neutron deux masse : 5 – 8,5 MeV/c ²	haut sa charge électrique est +2/3 le proton en contient deux, le neutron un masse : 1,5 – 4,5 MeV/c ²
Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le big bang. Aujourd'hui, on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.	deuxième famille muon un compagnon plus massif de l'électron masse : 105,658 MeV/c ²	neutrino muonique propriétés similaires à celles du neutrino électronique	étrange un compagnon plus lourd du "bas" masse : 80 – 155 MeV/c ²	charmé un compagnon plus lourd du "haut" masse : 1 000 – 1 400 MeV/c ²
	troisième famille tau encore plus lourd masse : 1 777 MeV/c ²	neutrino tauique propriétés similaires à celles du neutrino électronique	beauté encore plus lourd masse : 4 000 – 4 500 MeV/c ²	top le plus lourd de la famille (observé en 1995) masse : 174 300 ± 5 100 MeV/c ²
Bosons vecteurs Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.	photon grain élémentaire de la lumière, porteur de la force électromagnétique	gluon porteur de la force forte entre quarks	W[±], Z⁰ porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive	
Boson de Higgs ?	 responsable de la "brisure de symétrie électrofaible"			

Tableau. Constituants élémentaires.

sont assujettis qu'à l'interaction faible. Au sein du modèle standard, les neutrinos sont de masse nulle mais des expériences ont prouvé qu'ils en possèdent une, très faible, dont la valeur exacte reste inconnue à ce jour. La participation des constituants élémentaires aux interactions fondamentales est conditionnée par leurs nombres quantiques, ou charges d'interaction (charge électrique, charge de couleur⁽¹⁾...). À chaque constituant de la matière est associée son **antiparticule**, particule de même masse et de charges opposées. La **force gravitationnelle**, qui n'est pas incluse dans le modèle standard, s'exerce sur tous les fermions proportionnellement à leur masse. Le tableau des constituants élémentaires de la matière montre une autre classification, indépendante de leur participation aux interactions fondamentales, en trois générations ou familles. D'une famille à l'autre, les quarks et les leptons chargés de mêmes charges ne diffèrent que par leurs masses. L'électron, le quark haut et le quark bas, qui appartiennent à la première famille, sont les particules massives les plus légères. Stables, elles sont les constituants de la matière ordinaire. Par exemple, le **proton** contient deux quarks haut et un quark bas ; le **neutron** deux quarks bas et un quark haut. Les particules des deux autres familles sont instables et se désintègrent rapidement en particules stables de première génération. C'est la raison pour laquelle toute la matière stable de l'Univers est faite des constituants de la première famille. D'après la mécanique quantique, pour qu'il y ait interaction, il faut qu'au moins une particule élémentaire, un

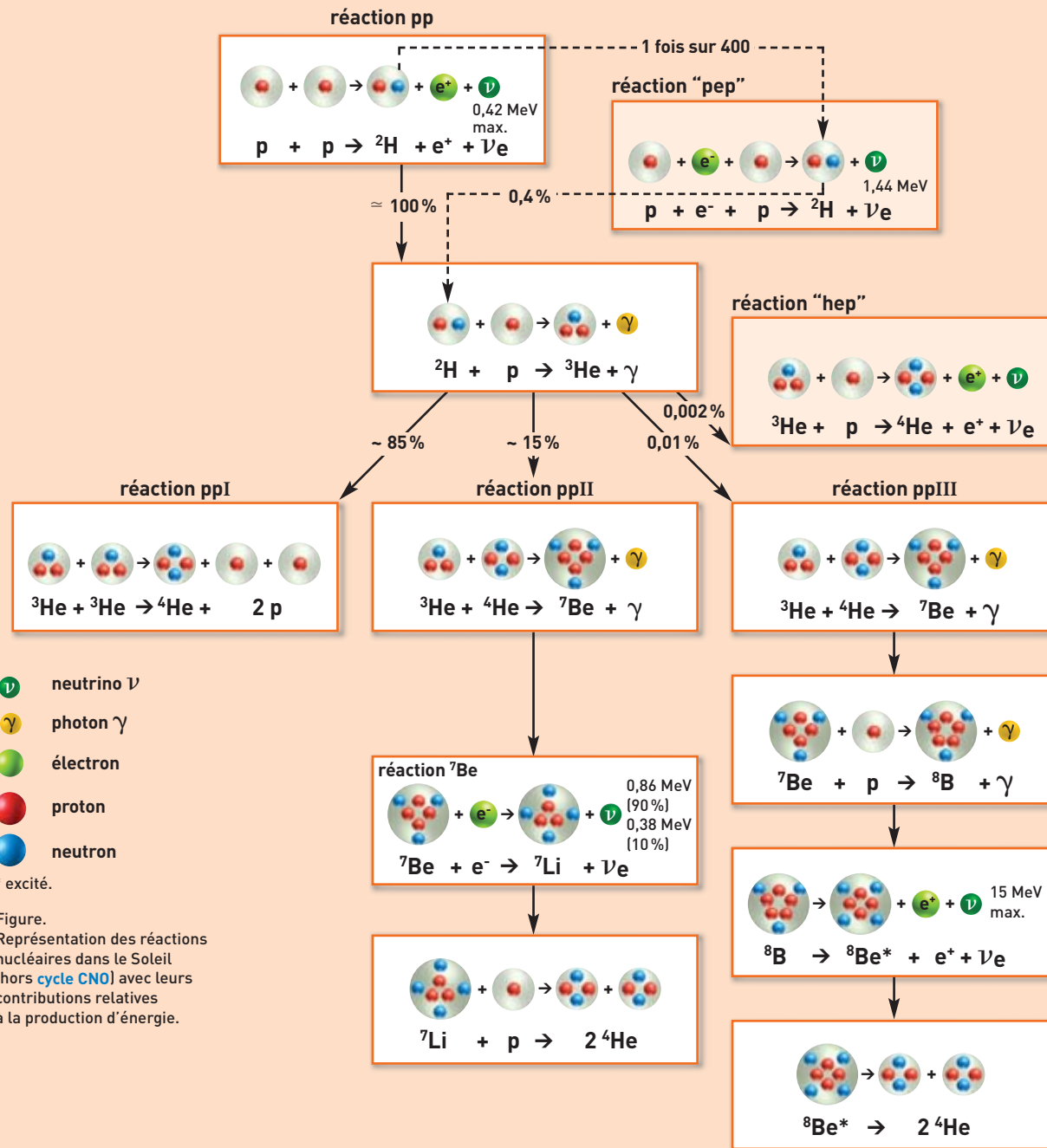
boson, soit émise, absorbée ou échangée. Le **photon** est le vecteur de l'interaction électromagnétique, les bosons **W⁺**, **W⁻** et **Z⁰** sont les médiateurs de l'interaction faible et les **gluons** les messagers de l'interaction forte. Les quarks et les leptons chargés échangent des photons mais conservent leur charge électrique après l'échange, le photon n'ayant pas de charge électrique. Comme la masse du photon est nulle, la portée de l'interaction électromagnétique est infinie. Dépourvus de charge électrique, les neutrinos sont les seuls fermions élémentaires à ne pas être sensibles à l'interaction électromagnétique. Dans la théorie électrofaible (unification des interactions faible et électromagnétique), l'interaction faible présente deux aspects : l'**interaction faible par courants chargés** où les vecteurs de l'interaction sont **W⁺** et **W⁻**, et l'**interaction faible par courant neutre** où le médiateur de l'interaction est **Z⁰**. Ces deux formes de l'interaction faible agissent entre tous les fermions élémentaires (quarks, leptons chargés et neutrinos). La masse de ces bosons étant très élevée (80 400 MeV/c² pour **W[±]** et 91 180 MeV/c² pour **Z⁰**), la portée de l'interaction faible est infime, de l'ordre de 10⁻¹⁸ m. Les bosons **W[±]** possédant une charge électrique non nulle, les fermions qui les échangent

changent de charge électrique et également de nature (**saveur**). Par contre, le boson **Z⁰** étant dépourvu de charge électrique, les fermions ne changent pas de nature. En fait, l'interaction faible par courant neutre est assez similaire à l'échange d'un photon. En règle générale, si deux fermions peuvent échanger un photon, ils sont aussi capables d'échanger un **Z⁰**. De son côté, un neutrino a la faculté d'échanger un **Z⁰** avec une autre particule, mais pas un photon. Seuls les quarks qui possèdent une charge de couleur échangent des gluons, lesquels portent eux-mêmes une charge de couleur. Ainsi, lors d'un échange de gluon entre quarks, ces derniers échangent leurs couleurs respectives. La masse des gluons est nulle, mais étant dotés d'une charge de couleur ils peuvent interagir. La portée de l'interaction forte est donc très courte, de l'ordre de 10⁻¹⁵ m. Le **graviton**, vecteur de l'interaction gravitationnelle, n'a pas encore été observé. La théorie prédit l'existence d'un autre mécanisme d'interaction fondamentale, responsable de la masse des particules élémentaires, dont le messager est le **boson de Higgs** qui reste à découvrir. Le champ de Higgs permet, selon cette théorie, de donner une masse aux fermions élémentaires interagissant avec lui.

(1) Charge de couleur : nombre quantique qui détermine la participation aux interactions fortes. La charge de couleur peut prendre trois valeurs : "rouge", "verte" ou "bleue", ces couleurs n'ayant rien à voir avec les couleurs visibles. Chaque quark porte l'une des trois charges de couleur et chaque antiquark l'une des trois charges d'anticouleur. Les gluons sont dotés de charges doubles couleur-anticouleur (huit combinaisons possibles).

interaction fondamentale	messager	actions
gravitationnelle	graviton ?	fait s'attirer deux masses entre elles et est responsable de la chute des corps
électromagnétique	photon	est responsable de l'attraction entre électrons et noyaux atomiques, et donc de la cohésion des atomes et des molécules
faible	W ⁺ , W ⁻ , Z ⁰	à la base de la fusion thermonucléaire dans le Soleil, elle assure sa longévité. La radioactivité β ⁻ et β ⁺ et les réactions impliquant le neutrino sont des interactions faibles
forte	gluons	assure la cohésion du noyau atomique

Tableau. Interactions fondamentales.



- neutrino ν
- photon γ
- électron
- proton
- neutron

* excité.

Figure. Représentation des réactions nucléaires dans le Soleil (hors cycle CNO) avec leurs contributions relatives à la production d'énergie.

$$4 p + 2 e^- \rightarrow {}^4\text{He} + 2 \nu_e + 27 \text{ MeV}^{(1)}$$

(1) Il s'agit d'une énergie moyenne.

Les réactions nucléaires débutent par la fusion de deux **protons** et se terminent par la production d'**hélium 4**, l'une *via* l'hélium 3, l'autre *via* le béryllium 7, suivie selon les cas de celle d'autres éléments légers (lithium 7 ou béryllium 8 *via* le bore 8). Ces chaînes de réactions proton-proton portent les noms de ppI, ppII et ppIII (figure).

Dans la première réaction de base, l'un des deux protons se transforme en **neutron** par le biais de l'**interaction faible**. Les deux particules jointes donnent naissance à une variété d'hydrogène, le **deutérium** (D ou ${}^2\text{H}$), formé donc d'un proton et d'un neutron : en même temps un anti-électron ou **positon** et un **neutrino** (électronique) de basse énergie s'envolent.

Le deutérium capture un proton pour former un **noyau** d'hélium 3 et un **photon gamma**. Deux hélium 3 réagissent pour produire un hélium 4 en libérant deux protons, renvoyés en début de chaîne. Dans quelque 85 % des cas, ainsi se termine la **chaîne ppI**. Cette chaîne est riche en neutrinos : 65 milliards d'entre eux traversent chaque cm^2 de notre peau à chaque seconde. Mais ceux-ci, de basse énergie, sont difficiles à mettre en évidence. Il a fallu toute la sensibilité du détecteur Gallex et de ses semblables pour les enregistrer [voir *Les neutrinos solaires, une énigme enfin résolue*].

Dans les 15 % de cas restants, un hélium 3 fusionne avec un hélium 4 pour produire un béryllium 7 et un photon gamma. Soit le béryllium 7 devient lithium 7 par capture d'un électron, ce lithium 7 capturant un proton pour donner deux hélium 4 directement (**ppII**), soit, en capturant un proton, il parvient indirectement au même résultat par le truchement du bore 8, qui se désintègre avec émission d'un neutrino énergétique en béryllium 8, lequel se brise aussitôt en deux hélium 4 (**ppIII**). Au bout de la chaîne ppIII se produit donc la désintégration du bore 8 en béryllium 8, dispensatrice de neutrinos de haute énergie, très prisés des chasseurs de neutrinos solaires.

Les taux de réactions dans le **plasma** solaire doivent être corrigés de l'effet d'écran des **électrons libres** [voir *Vision statique et dynamique de l'intérieur solaire*].

L'énergie engendrée sous forme de **rayons gamma** sert à maintenir chaude la chaudière solaire, ce qui lui évite de s'effondrer, et à la faire briller. L'énergie, sous forme de **photons**, filtre vers la surface. Elle est diffusée, absorbée, réémise par les **ions** et les **électrons**. Seuls les neutrinos traversent en droite ligne le Soleil, en deux secondes environ.