

L'énergie solaire : un important potentiel à concrétiser



CEA/Coulon

Matière première “gratuite” mais énergie encore relativement coûteuse à collecter et à utiliser ; l'énergie solaire dispose en dépit de ses limitations intrinsèques d'un potentiel énorme que les progrès technologiques tentent encore d'élargir, particulièrement dans la filière photovoltaïque.

Installation d'essai en extérieur de panneaux solaires en silicium polycristallin, gérée par le Genec au centre de Cadarache (Bouches-du-Rhône) du CEA.

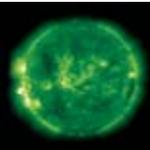
L'énergie solaire est une ressource relativement bien répartie géographiquement. Son potentiel théorique, énorme, représente plusieurs milliers de fois la consommation énergétique mondiale actuelle. De l'équateur jusqu'aux zones de latitude 45° nord ou sud, ce potentiel est intéressant tout au long de l'année. Au-delà, la saisonnalité devient plus marquée, et si la ressource demeure importante en été, des solutions d'appoint deviennent nécessaires l'hiver.

L'énergie solaire thermique : une forte marge de progression

La première manière de valoriser l'énergie solaire consiste à l'utiliser pour des applications thermiques, c'est-à-dire pour le chauffage de l'eau sanitaire ou des locaux. Pour ces utilisations, on utilise le plus souvent des capteurs vitrés : ils produisent l'effet de serre recherché, en laissant les rayons lumineux du Soleil traverser la vitre tout en évitant que la chaleur se dissipe trop facilement. Les rendements obtenus sont de l'ordre

de 50 % aux températures visées. Quatre mètres carrés permettent de répondre aux besoins en eau chaude d'une famille de quatre personnes, pour un montant moyen de 3 500 €, et douze à vingt mètres carrés assurent le chauffage d'une maison individuelle. Un chauffage d'appoint est nécessaire pour les périodes climatiques les plus défavorables et, en moyenne, une installation de chauffage solaire procure sur l'année un taux de couverture des besoins de l'ordre de 50 à 60 %, donc une économie sur la facture.

De tels capteurs thermiques produisent annuellement de 200 à 800 kWh par m², selon les besoins et les modes d'utilisation. Les valeurs les plus basses correspondent à des usages épisodiques d'eau chaude sanitaire à température élevée (supérieure à 55 °C), les plus fortes étant obtenues dans le cas de chauffage continu à basse température. Pour ce type d'application, souvent appelée “plancher solaire direct”, le fluide caloporteur issu des capteurs est injecté directement dans le plancher des bâtiments à une température de 25 à 30°. Cette conception conduit, d'une part, à des habitations très



confortables, d'autre part, à une des meilleures rentabilités technico-économiques.

Le développement du marché européen a été relativement stagnant dans les années 80, suite à de nombreuses contre-références, liées à un manque de formation des installateurs. Mais l'introduction de nouveaux concepts comme la garantie de résultats solaires et l'activité des marchés allemands, autrichiens et danois au cours de la décennie 90 ont permis un décollage notable. Le taux d'équipement par habitant est ainsi de respectivement 264 m² et 203 m² pour mille habitants en Grèce et en Autriche. L'Allemagne et le Danemark suivent avec respectivement 51 et 44 m². La France arrive en dixième position avec 4 m², loin derrière la moyenne européenne actuelle de 26 m² pour mille habitants. Le plan Soleil, lancé depuis trois ans, a relancé les ventes, notamment en métropole.

Pour donner une idée des perspectives envisagées, l'objectif de la Commission européenne fixé dans le Livre blanc sur l'énergie, indiquait un cumul de 100 millions de m² installés en Europe pour 2010. Par ailleurs, l'ESTIF (*European Solar Thermal Industry Federation*) estime le potentiel européen à 3 ou 4 m² par habitant, soit 100 fois la moyenne actuelle. Un tel taux d'équipement représenterait 6 % de la consommation finale d'énergie en Europe.

La marge de progression est donc forte, et les solutions pour une intégration facile et économique des systèmes dans le neuf comme dans l'ancien encore à développer.

L'électricité solaire thermodynamique : une certaine maturité

Lorsque l'on concentre le rayonnement solaire au foyer d'un concentrateur optique, il est possible d'atteindre des températures élevées. Ce principe, connu depuis l'Antiquité, utilise des capteurs paraboliques, cylindro-paraboliques, ou des centrales dites "à tour", dont une multitude d'héliostats orientables réfléchissent l'énergie solaire sur une chaudière unique située sur une tour. Il permet le réchauffement de fluides caloporteurs dans une gamme de températures allant de 250 à 800 °C. Ceux-ci viennent ensuite chauffer de la vapeur d'eau, qui entraîne un turboalternateur, comme dans les centrales thermiques conventionnelles.

Des unités prototypes de l'ordre de quelques dizaines de kW à une dizaine de MW ont été construites à



Une des trois installations solaires thermodynamiques à capteurs cylindro-paraboliques construites dans les années 80 par Luz Solar en Californie.

travers le monde au cours des deux décennies passées. Dans les Pyrénées, la centrale Thémis a fonctionné au début des années 80. Le plus grand développement commercial a toutefois été réalisé par la société Luz Solar, qui a construit dans les années 80 trois centrales à capteurs cylindro-paraboliques totalisant une puissance électrique nominale de 354 MWe, et fournissant au réseau près de Los Angeles une électricité valorisée principalement pendant les périodes de pointe des après-midi d'été.

Malgré la faillite du constructeur il y a dix ans, ces centrales n'ont cessé d'être exploitées et de voir leur productivité s'améliorer; elles témoignent maintenant de la maturité de cette filière avec des prix de revient de l'électricité autour de 10 à 12 cents le kWh.

Un potentiel d'amélioration de 20 à 30 % reste envisageable, notamment *via* la production directe de vapeur dans les capteurs, et l'optimisation des miroirs et du revêtement sélectif. En Europe, l'Allemagne et l'Espagne mènent conjointement des recherches sur ces thèmes, et une première réalisation de 50 MW est à l'étude dans la province d'Almeria.

Dans le cadre des facilités financières offertes par le Fonds pour l'Environnement Mondial, des réalisations sont à l'étude dans plusieurs pays tels que l'Égypte, l'Inde et le Brésil.

L'électricité solaire photovoltaïque : la course au rendement

Une autre manière de valoriser l'énergie solaire consiste à utiliser la conversion directe de la lumière en électricité. C'est l'effet "photovoltaïque", obtenu dans des matériaux particuliers dits **semi-conducteurs**, et par lequel chaque **photon** de lumière incidente permet de mettre en mouvement un **électron**, produisant ainsi un courant électrique (encadré F, *Comment transforme-t-on l'énergie solaire en électricité?*, p. 103). Le matériau le plus utilisé est le **silicium**, très abondant sur la planète, pour fabriquer des cellules solaires, que l'on assemble ensuite en **modules** ou **panneaux** solaires.

Les rendements obtenus usuellement lors de cette conversion sont compris entre 10 et 20 %, selon qu'il s'agisse de silicium amorphe, microcristallin, multicristallin ou monocristallin. Encore faut-il préciser le produit dont on parle : une cellule faite en laboratoire avec du silicium de grande pureté et des procédés sophistiqués pourra atteindre 25 % de rendement, ce qui se rapprochera de la limite théorique de 33 % pour une cellule à simple jonction. Son prix de revient sera alors tel que son usage sera réservé à des niches de marché particulières, comme par exemple les voitures électriques dont les concepteurs souhaitent remporter la célèbre course solaire australienne Darwin-Adelaïde.

En fabrication industrielle de grande série, le rendement moyen, c'est-à-dire incluant tous les aléas, avec du silicium cristallin sera moins élevé, généralement compris entre 14 et 16 %. Par contre, le prix de revient sera beaucoup plus faible, de sorte que le prix de l'électricité produite sera plus intéressant, et c'est ce critère-là, plus que tout autre, qui intéresse l'utilisateur.

L'électricité "solaire photovoltaïque" est en général utilisée de deux manières différentes, soit pour la fourniture d'électricité en sites isolés, soit pour

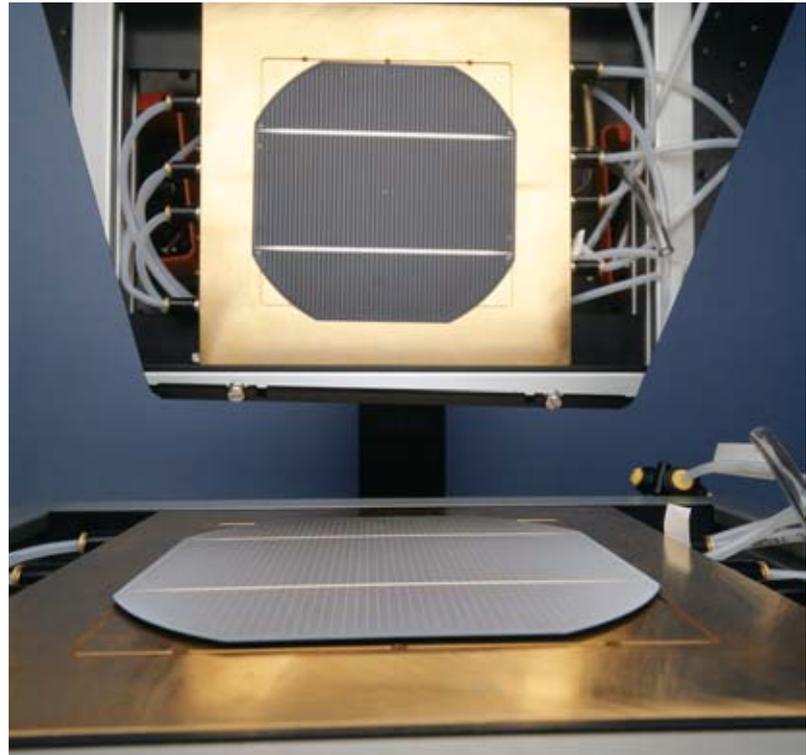
l'injection d'électricité sur un réseau électrique. La première application est la plus ancienne, et la plus répandue au regard des millions de systèmes installés à travers le monde. Elle a commencé dès les années soixante pour les satellites, où les modules solaires photovoltaïques se sont imposés face à la plupart des autres alternatives, pour des questions de poids et de fiabilité.

Les premières applications terrestres se sont répandues dans les années 70 et 80, essentiellement pour des besoins professionnels (stations météorologiques, relais de télécommunication, balisages maritime et aérien, protection cathodique), puis pour des applications liées à l'électrification rurale, comme l'éclairage domestique, l'audiovisuel et le pompage de l'eau.

Les dernières années ont permis une montée en puissance du nombre de réalisations, avec une croissance annuelle supérieure à 20% depuis vingt ans : en France, 90% des balises maritimes sont ainsi équipées et, dans les pays en développement, la plupart des stations de télécommunications ou les relais hertziens utilisent cette source d'énergie. Les programmes d'électrification rurale se réalisent maintenant par tranches de plusieurs milliers ou dizaines de milliers de systèmes.

La caractéristique principale de cette première catégorie d'application de l'électricité solaire photovoltaïque est qu'elle nécessite l'utilisation de batteries lorsque le besoin d'électricité n'est pas en phase avec la ressource solaire.

Le marché potentiel correspondant est gigantesque, face aux deux milliards d'habitants qui n'ont pas accès

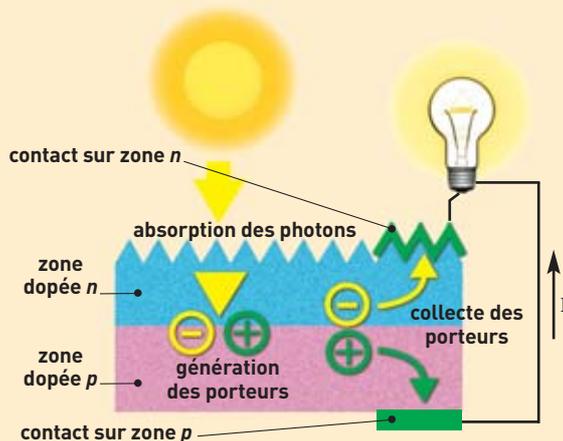


A. Bonn/CEA

Cellules photovoltaïques en silicium monocristallin sur un bloc de mesure de réponse spectrale au centre CEA de Grenoble. Après métallisation par sérigraphie et recuit, les cellules sont testées en relevant leur débit de courant à chaque longueur d'onde de la gamme spectrale solaire.

F Comment transforme-t-on l'énergie solaire en électricité ?

L'effet photovoltaïque utilisé dans les **cellules solaires** (elles-mêmes regroupées en **modules** puis en **panneaux**) pour convertir directement les rayons solaires en électricité implique la production et le transport de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière dans un matériau **semi-conducteur**. Le silicium a été choisi pour ses propriétés électroniques, caractérisées par la présence de quatre **électrons** sur sa couche périphérique (colonne IV du tableau de Mendeleïev). Dans le silicium solide, chaque **atome** est lié à quatre voisins, et tous les électrons de la couche périphérique participent aux liaisons. Si un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne V (phosphore par exemple), un des électrons ne participe pas aux liaisons ; il peut donc se déplacer dans le réseau. Il y a conduction par un électron, et le semi-conducteur est dit **dopé de type n**.

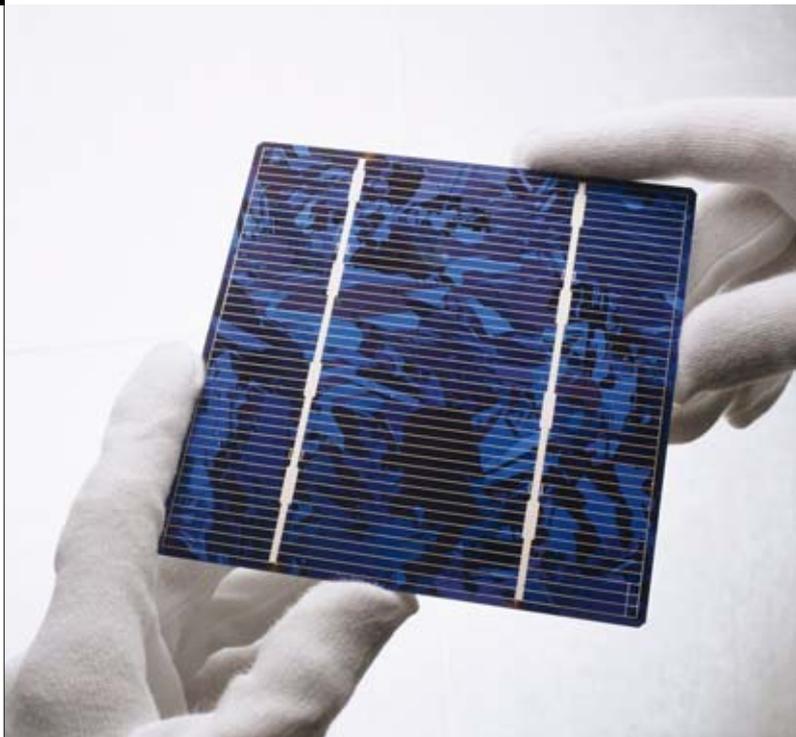
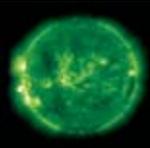


Si au contraire un atome de silicium est remplacé par un atome de la colonne III (bore par exemple), il manque un électron pour réaliser toutes les liaisons, manque qu'un électron peut venir combler. On dit alors qu'il y a conduction par un trou, et le semi-conducteur est dit **dopé de type p**. Les atomes tels que le bore ou le phosphore sont des **dopants** du silicium.

Lorsqu'un semi-conducteur de type *n* est mis en contact avec un semi-

conducteur de type *p*, les électrons en excès dans le matériau *n* diffusent dans le matériau *p*. La zone initialement dopée *n* devient chargée positivement, et la zone initialement dopée *p* devient chargée négativement. Il se crée donc un champ électrique entre les zones *n* et *p*, qui tend à repousser les électrons dans la zone *n*, et un équilibre s'établit. Une **jonction** a été créée, et, en ajoutant des contacts métalliques sur les zones *n* et

p, c'est une **diode** qui est obtenue. Lorsque cette diode est éclairée, les **photons** sont absorbés par le matériau et chaque photon donne naissance à un électron et à un trou (on parle de **paire électron-trou**). La jonction de la diode sépare les électrons et les trous, donnant naissance à une différence de potentiel entre les contacts *n* et *p*, et un courant *I* circule si une résistance est placée entre les contacts de la diode (figure).



Face avant représentant la grille de contact et la couche antireflet de cellules photovoltaïques en silicium multicristallin fabriquées par Photowatt.

à l'électricité. Les atouts essentiels du solaire sur ce marché sont sa fiabilité exceptionnelle – les modules les plus vendus, à base de silicium cristallin, font maintenant couramment l'objet de garanties de l'ordre de vingt ans, pour des durées de vie escomptées supérieures – ainsi que l'absence des coûts de distribution inhérents aux solutions techniques conventionnelles, que ce soit l'utilisation de groupes électrogènes alimentés par énergies fossiles (diesel, essence ou gaz), ou l'extension d'un réseau électrique principal jusqu'au lieu d'utilisation, dont la rentabilité est peu élevée quand les besoins sont faibles.

La seconde application est plus récente, mais elle bénéficie d'un taux de croissance encore plus rapide, entre 30 et 40% par an. Il s'agit de transformer directement le courant continu des modules photovoltaïques en

courant alternatif. L'électricité ainsi produite "au fil du Soleil" est soit consommée sur place soit injectée dans le réseau selon l'optimisation recherchée. L'intérêt économique et l'engouement actuel sur cette application viennent du fait que l'électricité peut être vendue à une compagnie de distribution d'électricité, qui, dans certains cas, peut proposer des tarifs de rachat intéressants pour contribuer à l'émergence de cette filière.

Ce "couplage" au réseau peut se faire de façon centralisée avec des centrales photovoltaïques de quelques mégawatts comme celles réalisées aux États-Unis au milieu des années 80. L'approche la plus courante actuellement utilise le caractère "réparti" de la ressource et se décline en réalisations "domestiques" de quelques kilowatts, que l'on appelle les "toits solaires": les précurseurs en la matière ont été la Suisse et l'Allemagne à la fin des années 80. Quelques opérations ou programmes de démonstration ont eu lieu au cours des années 90, et ont montré la faisabilité de maisons individuelles avec 30 ou 40 m² de capteurs photovoltaïques, qui deviennent autonomes sur un bilan annuel, la surproduction d'été compensant la sous-production d'hiver. À l'heure actuelle, des programmes importants sont menés au Japon et en Allemagne principalement, ces pays ayant installé environ 100 000 systèmes chacun, pour des puissances cumulées respectives de 450 et 300 MW. Le Japon prévoit 4,8 GW en 2010 et 40 GW en 2020 sur ces applications.

Toutes applications confondues, l'EPIA (*European Photovoltaic Industry Association*) a établi un scénario qui semble conservatif par rapport aux ambitions japonaises, arrivant à un marché mondial annuel de 54 GW en 2020, et montrant les possibilités de créer 2,3 millions d'emplois dans le monde.

Si à cette période, et même avec de tels chiffres de croissance, la part de l'électricité solaire photovoltaïque restera inférieure à 1% de la consommation mondiale, son potentiel à terme, c'est-à-dire après quelques décennies supplémentaires, est bien supérieur, comme le montre une étude récente de l'AIE (Agence internationale de l'énergie): l'utilisation de 40% des surfaces couvertes par des bâtiments existants conduit selon les pays à produire de 20 à 60% de leur consommation

A. Goni/CEA



Roberto Petronio/Total

Installation de panneaux solaires par Total au Maroc dans le cadre d'un programme d'électrification rurale.



ESA

électrique actuelle, sans la moindre emprise supplémentaire au sol. Pour la France, qui ne faisait pas partie du domaine de l'étude, une interpolation entre l'Espagne, l'Italie et l'Allemagne, permettrait d'envisager une disponibilité de 200 TWh, soit 40 % de la consommation électrique actuelle.

L'enjeu est donc loin d'être marginal et justifie une politique de développement volontariste. Pour l'instant, et comme dans le cas du solaire thermique, le taux d'équipement par Français est 10 fois inférieur à celui de l'Allemagne et 15 fois à celui du Japon.

La croissance du marché va de pair avec une baisse des prix. Les prix de vente en gros des modules sur le marché international se situent actuellement autour de 3 € le watt. L'observation des prix et des volumes de vente sur les vingt dernières années montre une diminution régulière, correspondant à une division des prix par deux tous les dix ans. La projection vers le futur conduit ainsi à un prix de l'ordre de 1,60 €/W en 2010.

Pour un système photovoltaïque couplé au réseau de quelques kW, le prix de revient pour l'utilisateur, installation et onduleur compris, est de l'ordre du double du prix du module sortie usine, soit entre 5 et 6 €/W.

Autre élément contribuant à cette baisse des prix, la recherche reste incontournable pour mettre en place les solutions technologiques qui permettront cette diffusion à grande échelle. Au niveau des matériaux de base, le spectre étudié s'étend du silicium actuel (cristallin ou amorphe) à d'autres candidats qui permettraient la réalisation de films minces et éventuellement flexibles tels que le CIS (diséléniure de cuivre et d'indium), voire même des semi-conducteurs organiques, à base de plastiques polymères.

Certains laboratoires commencent même à approfondir de nouveaux concepts qui pourraient amener à des rendements supérieurs : les cellules *tandem* à trois ou quatre jonctions approchent d'ores et déjà des 40 %. Au-delà, des travaux préliminaires ont montré que des dispositifs innovants à bande métallique intermédiaire, pour utiliser les photons de faible énergie, ou des concepts dits à "porteurs chauds" ou à "puits quantique" pouvaient atteindre des efficacités théoriques de l'ordre de 80 %.

Au niveau des systèmes, les axes de recherche doivent porter sur le stockage de l'électricité, qui représente une part très importante des coûts complets, la conversion de l'énergie, ainsi que sur la gestion de ces systèmes énergétiques : il s'agit de présenter à l'utilisateur une interface conviviale, proposant des scénarios de fonctionnement basés sur une analyse prédictive de la production et de la consommation, et délivrant des signaux d'alerte en cas de dysfonctionnement.

> **Philippe Malbranche**

Genec

Direction de la recherche technologique
CEA centre de Cadarache

Vue d'artiste du satellite européen Envisat en orbite. L'utilisation des modules solaires photovoltaïques pour les satellites a commencé dès les années soixante, s'imposant dans ce secteur pour des questions de poids et de fiabilité.

POUR EN SAVOIR PLUS

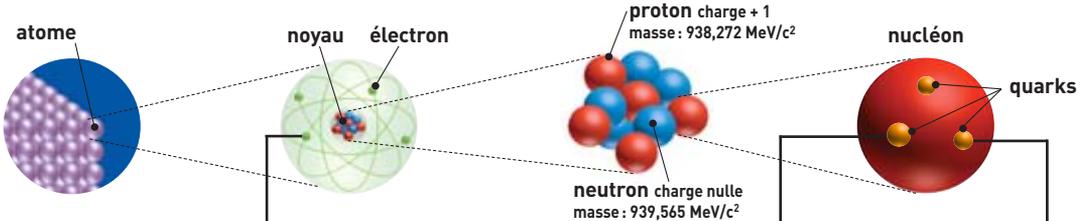
Les travaux du CEA dans le domaine de l'énergie solaire seront approfondis dans le prochain numéro de *Clefs CEA*, consacré aux Nouvelles technologies de l'énergie.

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. 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.	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
	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
	troisième famille	tau encore plus lourd masse : 1777 MeV/c ²	neutrino tauique propriétés similaires à celles du neutrino électronique	beauté	encore plus lourd masse : 4 000 – 4 500 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.