Le silicium : des grains de sable aux intelligences artificielles

written by Aurore Richel



De tous les éléments chimiques, rares sont ceux qui ont connu un destin aussi singulier que le silicium. Il est un constituant majeur des roches terrestres et un acteur peu connu des grands mécanismes géochimiques qui contribuent à réguler le climat de notre planète depuis des centaines de millions d'années. Il a contribué à la conception des premiers outils façonnés par l'Homme, il a été un élément fondateur de l'électronique moderne avant de devenir un symbole de la révolution numérique. Le silicium semble ainsi avoir traversé toutes les grandes périodes de notre histoire collective, reliant les origines de l'humanité aux technologies les plus avancées du 21ème siècle. Pourtant, derrière ce fil d'Ariane technologique, se cache une histoire plus profonde et complexe.

Est-ce que cet élément, dont le nom a inspiré la Silicon Valley, est aussi indispensable qu'il n'y paraît pour assurer notre modernité ? Est-ce que son extraction et sa transformation sont sans conséquences pour l'environnement? Est-ce que le silicium présente des fragilités sur le plan géopolitique ou économique ? Est-ce que les nouvelles technologiques reposent toutes sur le silicium et pourrions-nous nous en passer ? Allons-nous devenir complètement dépendants du silicium ? Ce sont les points que nous décrivons dans ce dossier dédié à un élément pas comme les autres.

Prologue

1955, États-Unis. Isaac Asimov, alors professeur de biochimie à

l'université de Boston, publie dans *The Magazine of Fantasy & Science-Fiction* une nouvelle intitulée *The Talking Stone*. À ce moment-là, Asimov est déjà une figure centrale de la science-fiction et un vulgarisateur scientifique influent, et son intérêt pour les conditions chimiques de l'émergence du vivant nourrit directement ses fictions. Dans ce texte, il explore une idée qui deviendra un motif durable de la science-fiction : la possibilité d'une vie extraterrestre fondée non pas sur le carbone, mais sur le silicium.[1]

Depuis les années 1950, le silicium s'est ainsi progressivement imposé dans l'imaginaire scientifique et culturel. Situé dans la même colonne du tableau périodique que le carbone, il partage avec ce dernier certaines propriétés chimiques, notamment la capacité à former des assemblages moléculaires complexes. Cette proximité a longtemps alimenté l'hypothèse d'une biochimie alternative, même si, dans les faits, la chimie du silicium se révèle plus rigide et moins diversifiée que celle du carbone, limitant ainsi la stabilité et la variété des architectures vivantes qu'il pourrait engendrer. Asimov exploite précisément cette tension entre analogie chimique et contraintes réelles pour imaginer des formes de vie adaptées à des environnements extrêmes, tels que des mondes rocheux, froids ou pauvres en molécules organiques. Dans *The Talking Stone*, ces entités associées à des environnements d'astéroïdes prennent ainsi la forme d'êtres essentiellement minéraux, où la frontière entre organisme vivant et roche devient presque indiscernable.

L'intérêt pour le silicium s'est ensuite diffusé bien au-delà de l'œuvre d'Asimov. Le thème apparaît notamment dans *Star Trek*, où la créature Horta, au cœur de l'épisode *The Devil in the Dark* (1967), est présentée comme une forme de vie reposant sur le silicium et capable de survivre dans la roche en fusion. On retrouve également cette idée dans *Sentenced to Prism* (1985), où l'écrivain Alan Dean Foster imagine une planète dominée par une chimie du silicium et peuplée de formes de vie radicalement différentes de celles vivant sur Terre. Dans ces différentes œuvres, le silicium est bien plus qu'un simple élément chimique . Il devient, en effet, un puissant outil narratif permettant d'explorer l'idée d'un vivant qui ne serait pas seulement différent du nôtre, mais également étranger dans son fonctionnement et dans son évolution. [2]

Le silicium s'est donc forgé une place singulière à la frontière entre science et imaginaire. Si la plupart des biologistes considèrent aujourd'hui que le carbone demeure le candidat le plus favorable à l'émergence d'une chimie du vivant complexe, l'hypothèse d'une vie à base de silicium continue de susciter l'intérêt des exobiologistes.[3] Ce qui n'était au départ qu'une spéculation littéraire est progressivement devenu un véritable objet de réflexion scientifique. Plus de 70 ans après Asimov, la vie fondée sur le silicium demeure hypothétique, mais elle continue d'incarner l'une des questions les plus fascinantes de l'exobiologie : sommes-nous certains que la vie ailleurs dans l'Univers doit nécessairement reposer sur les mêmes fondements chimiques que celle que nous connaissons sur Terre ? [4]

Le géant discret de la planète Terre

Le silicium (de symbole Si) est le second élément le plus abondant de la croûte terrestre après l'oxygène.[5] Plus d'un quart de la masse de notre planète repose, en effet, sur le silicium. Quand ils sont associés, le silicium et l'oxygène forment des silicates, une immense famille de minéraux. Les feldspaths, les quartz, les micas, les pyroxènes ou encore les argiles appartiennent à cette famille et constituent l'essentiel des sables, des granites, des basaltes et de nombreuses roches sédimentaires. Autrement dit, **la quasi-totalité des paysages minéraux qui nous entourent est dominée par la chimie du silicium**.

Le silicium présente quelques caractéristiques communes avec le carbone. Toutefois, leurs comportements géochimiques diffèrent profondément. Alors que le carbone est au cœur de la biosphère et circule activement entre les organismes vivants, l'atmosphère, les océans et les sols, le silicium est principalement concentré dans la lithosphère. Son cycle biogéochimique repose essentiellement sur l'altération chimique des roches silicatées, qui libère dans les eaux naturelles de l'acide orthosilicique, $Si(OH)_4$. Cet acide silicique dissous est ensuite assimilé par divers organismes. Les diatomées, algues microscopiques responsables d'environ 20 % de la production primaire mondiale, l'utilisent pour élaborer leurs frustules (c'est-à-dire leurs coques externes) de silice biogénique ($SiO_2 \cdot nH_2O$).[6] Après leur mort, une partie de cette silice

sédimente vers les fonds océaniques, participant au cycle global du silicium. En influençant la productivité du phytoplancton et les transferts de matière organique vers les profondeurs, les diatomées contribuent également de manière indirecte à la séquestration du carbone dans l'océan.[7]

Ainsi, bien qu'il ne constitue pas l'ossature moléculaire du vivant comme le carbone, le silicium joue un rôle majeur dans le fonctionnement des écosystèmes terrestres et marins. Par son implication dans l'altération des roches, la productivité océanique et certains mécanismes de régulation du climat, il participe activement aux grands équilibres biogéochimiques de la planète.[8]

Un fameux paradoxe biologique

Puisqu'ils occupent la même colonne du tableau périodique, le silicium et le carbone partagent des caractéristiques fondamentales, dont celle de posséder 4 électrons de valence leur permettant d'établir 4 liaisons covalentes. C'est cette « ressemblance chimique » qui a longtemps cultivé l'idée séduisante que les deux atomes pourraient être équivalents, et qu'une vie pourrait donc reposer sur le silicium plutôt que sur le carbone. Bien que cette analogie fascine les auteurs de science-fiction, la chimie impose pourtant une différence décisive.

Le carbone possède la capacité de s'assembler avec de nombreux atomes (comme l'oxygène, l'hydrogène, l'azote, les halogènes, le phosphore, le soufre ou le silicium), mais aussi avec lui-même. Les liaisons carbone-carbone ainsi créées sont suffisamment stables pour construire des architectures durables, mais aussi assez flexibles pour autoriser une diversité presque infinie de structures (cycles aromatiques, hélices, réseaux complexes, etc.). C'est cette plasticité moléculaire qui fonde l'ensemble de la chimie du vivant telle que nous la connaissons. Pour ce qui est du silicium, celui-ci peut lui aussi se lier à de nombreux éléments, mais sa capacité à former des structures complexes comparables à celles du carbone est plus limitée. Les liaisons silicium–silicium sont généralement moins stables, notamment en présence d'eau et d'oxygène, ce qui réduit la diversité et la durabilité des architectures moléculaires qu'il peut engendrer.

Qui plus est, le silicium se distingue par son comportement vis-à-vis de l'oxygène. Il forme spontanément un oxyde particulièrement stable, le dioxyde de silicium (SiO_2), très peu soluble dans l'eau. Dans un environnement comme celui de la Terre, riche en oxygène et en eau, cette propriété constitue un obstacle majeur. Une biochimie fondée sur le silicium devrait constamment composer avec la formation de produits d'oxydation particulièrement stables, difficiles à transformer ou à recycler. Là où le carbone peut circuler relativement aisément grâce à des composés comme le dioxyde de carbone, le silicium tend à se retrouver piégé sous forme de silicates ou de dioxyde de silicium. Cette contrainte semble rendre difficile l'émergence d'une chimie aussi souple, complexe et dynamique que celle du vivant terrestre.[9]

C'est pour cette raison que les chimistes considèrent aujourd'hui une biologie strictement basée sur le silicium comme très improbable dans les conditions terrestres. Cette contrainte n'exclut pas des scénarios plus ouverts, dans lesquels le silicium pourrait intervenir en complément du carbone, notamment dans certaines architectures moléculaires hybrides envisagées en astrobiologie.[10]

Un pilier de notre civilisation matérielle

Si le silicium n'a pas conquis le vivant, il a en revanche conquis la technologie. Pour en comprendre la raison, il faut se souvenir que le silicium n'existe que très rarement sous forme élémentaire libre, mais qu'il se trouve, à l'état naturel, presque toujours associé à d'autres éléments, notamment l'oxygène. On retrouve ainsi du silicium dans le sable, le quartz et une immense diversité de roches. C'est cette abondance massive, cette omniprésence et cet accès aisé qui ont façonné très tôt les usages que l'Homme en a faits.[11]

Bien avant même d'être identifié comme élément chimique à part entière au début du 19ème siècle, le silicium était donc déjà au cœur des pratiques humaines à travers ses formes naturelles, en particulier le silex. Utilisée dès la Préhistoire, cette roche siliceuse fait partie des tout premiers matériaux techniques à avoir été maîtrisés par l'Homme. Sa dureté et surtout sa capacité à

se fracturer en formant des arêtes extrêmement tranchantes en ont fait un outil idéal pour accompagner les gestes fondamentaux de survie, marquant une étape essentielle dans l'émergence des premières techniques humaines.

Ce lien profond entre le silicium et les matériaux fondateurs de la civilisation se retrouve jusque dans son nom. En effet, le terme « *silicium* » dérive du latin *silex, silicis*, qui désigne le silex. Le suffixe « -ium », classique dans la nomenclature des éléments chimiques, vient compléter cette racine pour former sa dénomination scientifique.

Mais le silex n'est pas la seule expression de ce silicium omniprésent. Le sable, constitué en grande partie de grains de silice issus de l'érosion des roches, joue lui aussi un rôle fondamental. Par ses propriétés physiques, il est devenu une ressource essentielle pour la **fabrication des mortiers et des ciments**, matériaux indispensables à la construction. Il est aussi à l'origine d'un matériau bien plus symbolique encore, à savoir **le verre**.

Le verre naît de la fusion du sable siliceux à très haute température, souvent en présence d'additifs comme la soude ou la potasse qui permettent d'abaisser son point de fusion.[12] Dans l'Antiquité, sa fabrication est longtemps restée imparfaite, donnant des objets opaques et irréguliers. Peu à peu, les civilisations égyptienne puis romaine en ont maîtrisé la production et en ont fait un matériau à la fois décoratif et utilitaire, utilisé pour les récipients puis pour les vitres. Avec ces dernières, le verre a profondément transformé l'architecture et le quotidien en laissant entrer la lumière tout en protégeant les espaces de vie. Matériau à la fois solide et transparent, il doit ses propriétés à la structure particulière de la silice, capable de former un réseau amorphe stable en refroidissant.

Ainsi, le silicium s'est imposé **indirectement** comme un élément fondateur de notre civilisation matérielle.

De la métallurgie à l'ère des semiconducteurs

Pendant longtemps, les usages du silicium sont donc restés

essentiellement structurels et traditionnels. Le silicium n'était jamais isolé en tant que tel puisque ce sont les matrices qui le contiennent (sable, silex) qui étaient directement travaillées. Néanmoins, un changement véritable s'est opéré à partir du moment où le silicium a été isolé sous une forme plus pure, dès la fin du 19ème siècle.

Le silicium est alors obtenu industriellement par réduction de la silice à très haute température dans des fours, donnant un matériau appelé **silicium métallurgique**. Celui-ci est d'abord utilisé principalement comme additif dans les alliages, notamment avec l'aluminium et l'acier, afin d'améliorer leurs propriétés mécaniques. Dans les années 1930, le silicium isolé a également été testé par le géant américain de la chimie DuPont comme une alternatives aux pigments à base de plomb dans la conception de certaines peintures.

Ces premières applications restaient encore éloignées du rôle central que le silicium jouera plus tard dans la **fabrication de composants électroniques**. Néanmoins, elles ont été essentielles pour mettre au point les méthodes de production de grandes quantités de silicium de pureté satisfaisante.[13]

Vers la fin du 19ème siècle, les chercheurs ont commencé à remarquer un comportement étrange dans certains solides cristallins, dont le silicium. Contrairement aux métaux, ces matériaux ne conduisaient pas le courant électrique de manière constante. Dans certaines conditions, le courant passait facilement dans un sens, tandis qu'il était fortement freiné dans l'autre. À cette époque, ces observations étaient restées purement empiriques. On avait constaté le phénomène sans réellement en comprendre l'origine. Au début du 20ème siècle, cette propriété surprenante (et encore peu comprise) avait trouvé une première application concrète associée aux débuts de la radio. On utilisait des cristaux, dont des cristaux de silicium, pour détecter les signaux radio. En posant un simple contact métallique sur un cristal de silicium, on obtenait un dispositif capable de laisser passer le courant dans un seul sens. Cela permettait de transformer un signal alternatif, qui oscille en permanence, en un signal exploitable. Ces détecteurs à cristal

fonctionnaient, mais ils restaient fragiles, instables et très sensibles aux imperfections du matériau, ce qui limitait fortement leur fiabilité.

Dans les années 1930, les chercheurs ont donc tenté de comprendre de manière plus fondamentale le phénomène afin de mieux le contrôler. Ils ont démontré que la conduction électrique dépendait étroitement de la structure interne des cristaux et de la présence d'impuretés. Ils sont aussi arrivés à la conclusion que ces matériaux n'étaient ni de simples conducteurs ni de simples isolants, mais se situaient entre les deux, avec des propriétés spécifiques encore difficiles à maîtriser. L'arrivée de la Seconde Guerre mondiale, associée à la demande en technologies de communication et de radar fiables, avait fortement accéléré les recherches dans ce domaine.[14]

Dès les années 1940, les scientifiques ont alors développé la théorie des bandes d'énergie, qui décrit le comportement des électrons dans les solides en termes de niveaux d'énergie autorisés et interdits. Cette approche a enfin permis de comprendre pourquoi certains matériaux, comme le silicium, peuvent conduire l'électricité dans certaines conditions seulement. C'est dans ce cadre que l'appellation moderne de **semiconducteur** avait progressivement vu le jour.[15]

Cette compréhension du fonctionnement des semiconducteurs ont débouché, quelques années plus tard, sur une invention majeure. En 1947, les laboratoires Bell ont imaginé le **transistor**, un composant semi-conducteur capable d'amplifier ou de commuter un signal électrique.[16] Autrement dit, un transistor peut jouer le rôle d'un interrupteur extrêmement rapide ou d'un amplificateur de courant, ce qui en fait une brique fondamentale de l'électronique moderne. Ce transistor imaginé par les laboratoires Bell a d'abord été fabriqué avec du germanium, plus facile à purifier à l'époque, mais le silicium est rapidement apparu comme un matériau bien plus prometteur. Dans les années 1950, les progrès dans la purification et surtout dans la maîtrise de sa structure cristalline ont permis de l'utiliser de manière fiable. Le silicium est alors progressivement devenu un **matériau central de l'électronique moderne**, grâce à la possibilité de contrôler très finement ses

propriétés électriques par l'ajout d'impuretés et la création de structures internes contrôlées. C'est dans ce contexte que des entreprises comme Texas Instruments ont joué un rôle décisif. Dès le milieu des années 1950, elles sont parvenues à produire des transistors au silicium de manière industrielle et reproductible, ouvrant la voie à leur diffusion à grande échelle.[17]

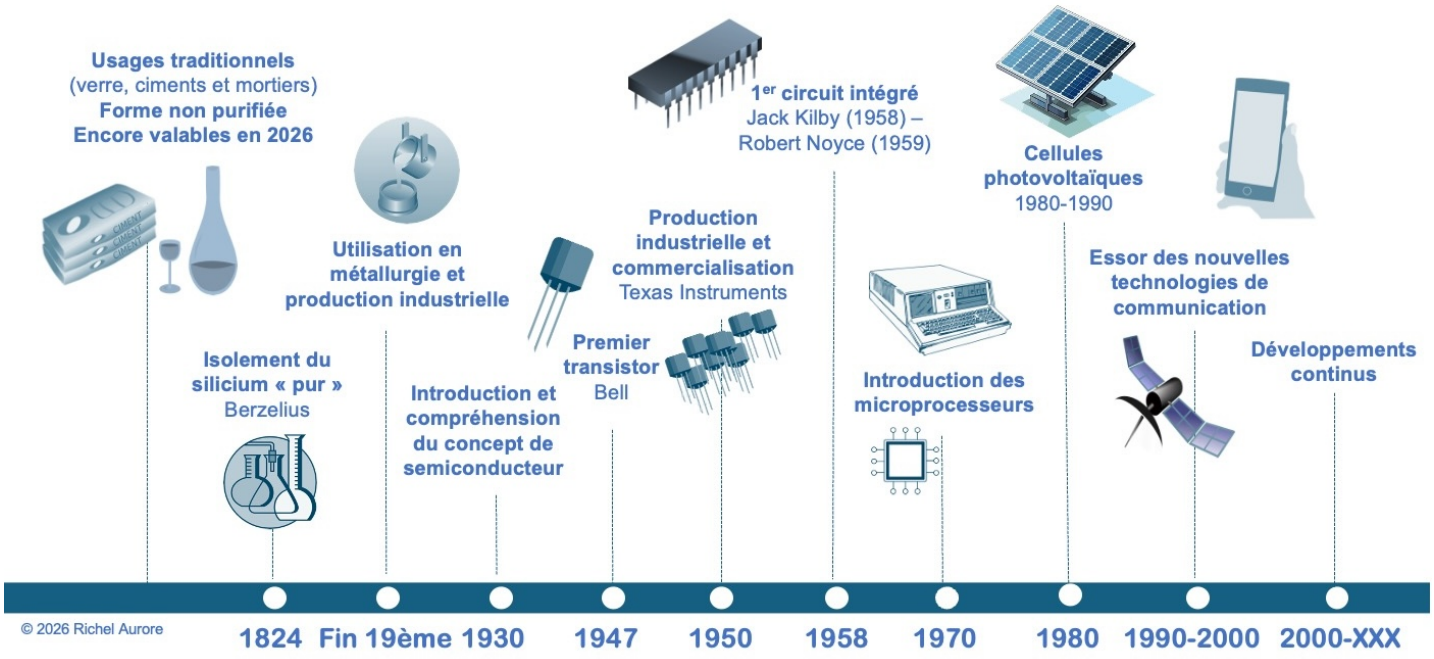


Figure 1. Évolution des usages du silicium au fil des années.

En 1958, cette dynamique de commercialisation et d'appropriation des nouvelles technologies reposant sur le silicium a franchi une nouvelle étape décisive. Jack Kilby, chez Texas Instruments, a mis au point le **premier circuit intégré**, c'est-à-dire un ensemble de composants électroniques miniaturisés et interconnectés sur une même puce de silicium. Presque simultanément, en 1959, Robert Noyce, connu comme étant l'un des pionniers de la **Silicon Valley**, a proposé une architecture plus adaptée à la production industrielle, ouvrant la voie à une fabrication à grande échelle.[18] À partir de ce moment, le silicium s'est définitivement imposé comme le matériau central de l'électronique moderne.

Dès les années 1960, cette évolution s'est nettement accélérée. Les progrès de la microfabrication ont permis d'intégrer un nombre toujours plus élevé de transistors sur une même puce, tout en réduisant progressivement les coûts. Les circuits intégrés ont gagné en complexité et ont trouvé des applications dans des

domaines de plus en plus variés, de l'aéronautique aux télécommunications, en passant par les premiers systèmes informatiques industriels.[19]

Dans les années 1970, une nouvelle étape décisive a été franchie avec l'apparition des premiers **microprocesseurs**. Ces circuits programmables, capables d'exécuter des instructions, ont transformé l'architecture des systèmes électroniques. Le silicium est alors devenu **le cœur des ordinateurs**, remplaçant progressivement des assemblages complexes de composants par une seule puce capable de tout coordonner. Cette simplification a ouvert la voie à l'informatique personnelle.

Les années 1980 et 1990 ont ensuite été marquées par une diffusion massive de ces technologies. Les ordinateurs personnels se sont généralisés, tandis que les télécommunications sont entrées dans l'ère numérique avec l'essor des réseaux mobiles puis d'Internet. Dans le même temps, le silicium a commencé à jouer un rôle majeur dans un autre domaine, à savoir celui de la conversion de l'énergie solaire. Les **cellules photovoltaïques en silicium** se sont développées et sont devenues la technologie dominante pour transformer la lumière en électricité, notamment grâce à leur fiabilité et à leur coût de production en baisse. Parallèlement, le silicium s'est également imposé dans les technologies spatiales. Les satellites, qui doivent fonctionner de manière autonome dans des conditions extrêmes, reposent encore largement sur des panneaux solaires en silicium et sur des circuits électroniques résistants aux radiations.

Depuis les années 2000, le silicium est devenu omniprésent dans la vie quotidienne. Smartphones, tablettes, capteurs et systèmes embarqués reposent tous sur des circuits intégrés à base de silicium toujours plus puissants et miniaturisés. Les procédés de fabrication atteignent alors des échelles nanométriques, où les structures internes se jouent à l'échelle de quelques dizaines d'atomes.

Depuis les années 2010, cette **course à la miniaturisation** s'est rapprochée de limites physiques fondamentales, liées à la taille même des atomes et aux effets quantiques. Désormais, l'innovation

ne repose plus uniquement sur la réduction des dimensions, mais aussi sur de nouvelles architectures de puces, une meilleure efficacité énergétique et une intégration toujours plus poussée des fonctions.

Aujourd'hui, le silicium demeure au cœur de la révolution numérique et énergétique, même si d'autres matériaux sont explorés pour compléter ou dépasser certaines de ses limites. Il reste néanmoins l'un des piliers technologiques les plus structurants de la civilisation contemporaine, reliant directement les premières observations sur les cristaux au 19ème siècle aux systèmes électroniques, énergétiques et spatiaux les plus avancés du 21ème siècle.

La raison d'être de la Silicon Valley

La compréhension des semiconducteurs et l'invention du transistor, reposant sur le silicium, n'ont pas uniquement révolutionné l'électronique et les télécommunications. A vrai dire, elles ont aussi profondément structuré la géographie de l'innovation.

Jusqu'à la fin des années 1950, les progrès liés au silicium étaient concentrés dans quelques laboratoires universitaires (Stanford) ou industriels (Bell, Texas Instruments ou Fairchild Semiconductor là où était employé Robert Noyce). Les avancées émergeaient alors dans un petit nombre de centres très spécialisés, étroitement liés à la recherche fondamentale et aux besoins technologiques de l'industrie électronique naissante.

Mais la demande massive de la défense américaine, dans le contexte de la guerre froide, avait rapidement changé la donne. Les besoins en systèmes de communication, en radars, puis en technologies spatiales avaient fortement soutenu le développement des semiconducteurs. L'électronique au silicium était devenue une technologie stratégique, largement financée par des programmes militaires et aérospatiaux, ce qui avait favorisé l'émergence de pôles d'innovation capables de répondre rapidement à ces besoins. Dans cette optique, Stanford avait joué un rôle structurant majeur, facilitant la coopération effective entre acteurs académiques et industries, qui s'était matérialisée dans un lieu unique au sud de

la baie de San Francisco : la **Silicon Valley**.[20]

L'expression « Silicon Valley » n'était apparue que bien après, dans le courant des années 1970, pour désigner cette région devenue centrale dans l'industrie des circuits intégrés. Elle n'était pas le fruit d'une rupture brutale, mais de l'agrégation progressive d'entreprises issues des avancées sur le silicium, souvent fondées par des ingénieurs formés ou passés par les pionniers du secteur.

Au-delà des semiconducteurs, un marché bien plus large

Aujourd'hui, malgré la popularité et la demande croissante en composants électroniques, l'usage du silicium dans le domaine des semiconducteurs ne représente qu'une **très faible fraction de la demande mondiale en silicium** (**environ 3%**).

La majorité du silicium extrait disponible sur le marché se répartit en 3 grandes applications majeures dont la production de **cellules photovoltaïques** (12%), la **chimie** (35%) avec la production de silicones et de silanes, des molécules utilisées pour les adhésifs, les mastics, les lubrifiants, les matériaux d'étanchéité, les revêtements, ainsi que de nombreux usages en cosmétique, en médecine et dans l'industrie, et la **production d'alliage** (45%) qui représente la plus grande consommation du silicium disponible sur le marché (**Figure 2**).[21]

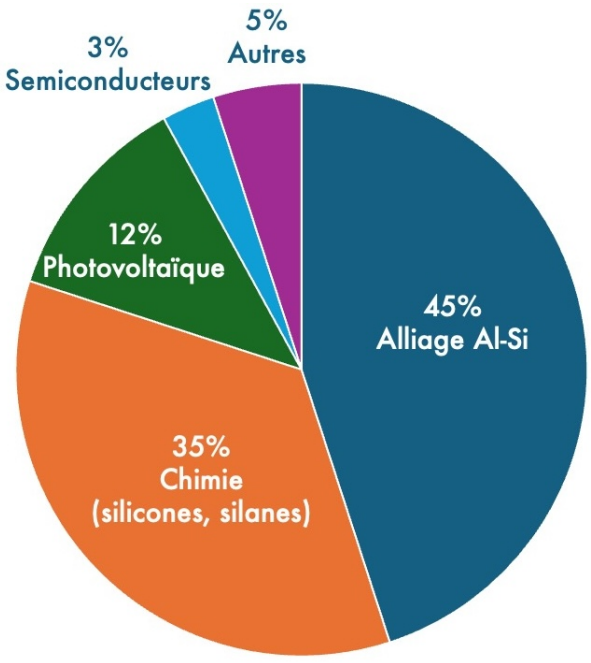


Figure 2. Répartition des usages actuels du silicium extrait (en %)

Pour satisfaire ces différents usages industriels, des **niveaux de pureté différents** sont requis. Cette diversité de « grades » reflète en réalité toute la chaîne de transformation du matériau, depuis la silice issue des roches jusqu'aux applications les plus exigeantes de l'électronique moderne.[22] Au plus la pureté est élevée et au plus, fort logiquement, le coût est élevé.[23]

La forme la plus courante est le **silicium métallurgique**. Il est obtenu par réduction de la silice à très haute température dans des fours électriques. Il présente une pureté généralement comprise entre **98 et 99 %** et contient encore des traces d'éléments comme le fer, l'aluminium ou le calcium. Aujourd'hui, il est surtout utilisé dans l'industrie métallurgique, notamment pour la fabrication d'alliages aluminium-silicium, très présents dans l'**automobile et l'aéronautique**, où ils permettent d'alléger les pièces tout en améliorant leur résistance mécanique. Il sert également de matière première pour produire des composés chimiques à base de silicium, comme les silicones dans le **secteur chimique**.

Un niveau de pureté supérieur correspond au **silicium de grade solaire**. Ici, les impuretés doivent être fortement réduites, car elles perturbent directement la conversion de la lumière en électricité. Ce silicium, typiquement pur à **99,999 %**, est utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques.

Enfin, le niveau le plus exigeant est celui du **silicium de grade électronique**. Sa pureté atteint des niveaux extrêmement élevés, de l'ordre de **99,9999 % à 99,9999999 %,** avec des impuretés contrôlées jusqu'à l'échelle du milliardième. Ce matériau est indispensable à la fabrication des semiconducteurs, c'est-à-dire des puces électroniques, transistors et circuits intégrés. À ce niveau de pureté, la moindre trace d'impureté peut modifier le comportement électrique du matériau, ce qui explique la sophistication extrême des procédés de purification et de cristallisation.

Pour donner des **ordres de grandeurs**, on considère aujourd'hui que le silicium de grade métallurgique se négocie autour de 1500-3000 USD par tonne. Le grade solaire a un prix très volatil, influencé par l'offre et la demande, et peut osciller entre 5000 et 40.000 USD/tonne. Le grade électronique, le plus cher, se négocie aux

alentours de 50.000-200.000 USD/tonne.[24]

Une empreinte environnementale et énergétique non négligeable

Les niveaux de pureté les plus élevés, qui sont les plus chers, ont également des coûts énergétiques et environnementaux non négligeables. La production du silicium métallurgique nécessite déjà des températures supérieures à 1 900 °C dans des fours électriques à arc, avec une consommation énergétique typique de l'ordre de **11 à 13 kWh par kilogramme de silicium produit**. La réaction repose en outre sur l'utilisation de carbone, généralement sous forme de coke ou de charbon, qui sert à réduire la silice (SiO_2) en silicium. Cette étape génère d'importantes émissions de dioxyde de carbone, estimées à environ **5 tonnes de CO_2 par tonne de silicium métallurgique produite**.[25]

Lorsque le silicium doit atteindre les niveaux de pureté requis pour les cellules photovoltaïques ou les semiconducteurs, les besoins augmentent encore fortement. Les procédés de purification les plus répandus, notamment le procédé Siemens, transforment d'abord le silicium en composés chlorés volatils avant de le redéposer sous forme de silicium ultrapur sur des tiges chauffées à plus de 1 100 °C. Cette étape est particulièrement énergivore et consomme généralement entre **60 et 120 kWh par kilogramme de silicium produit**, soit près de dix fois plus que la production du silicium métallurgique.[26] À cette consommation électrique s'ajoute l'utilisation de substances telles que l'acide chlorhydrique, le trichlorosilane ou le tétrachlorure de silicium. Ces composés sont recyclés dans les installations modernes, mais leur manipulation exige des infrastructures complexes afin de limiter les rejets et les risques environnementaux.

L'empreinte environnementale du silicium dépend donc fortement du niveau de pureté recherché et de l'origine de l'électricité utilisée lors de sa fabrication. Un kilogramme de silicium destiné à un alliage métallique nécessite relativement peu de transformations supplémentaires, tandis qu'un kilogramme de silicium électronique ayant une pureté supérieure à 99,9999999 % mobilise une succession d'étapes de purification parmi les plus exigeantes de l'industrie chimique moderne. Cette réalité explique

pourquoi les chercheurs et les industriels développent aujourd'hui de nouvelles méthodes de purification moins énergivores, en particulier pour répondre à la demande croissante des secteurs photovoltaïque et électronique.[27]

Un marché en croissance dominé par la Chine

L'importance stratégique du silicium dans des domaines tels que la transition énergétique, les technologies du numérique et le développement continu des infrastructures électroniques se reflète directement dans l'évolution de son marché mondial. [28]

En 2021, le marché du silicium extrait était estimé à plus de 15 milliards de dollars, et pourrait atteindre plus de 23,5 milliards USD en 2030, soit une croissance annuelle moyenne d'environ 5%. Cependant, cette croissance n'est par répartie de manière uniforme à travers le monde. En 2021, la **région Asie-Pacifique dominait largement le marché**, avec plus de 44% de la demande mondiale. Cette position s'explique par la concentration en Chine, au Japon, en Corée du Sud et à Taïwan d'une grande partie des industries consommatrices de silicium (métallurgie, fabrication de panneaux photovoltaïques, production de silicones et industrie des semiconducteurs). La Chine occupe à elle seule une place centrale, tant comme productrice que comme consommatrice de silicium. En 2019, l**a Chine produisait plus de 70% du silicium disponible sur le marché** (tous grades confondus).[29]

L'Europe affiche, quant à elle, la **croissance la plus rapide du marché mondial**. Cette dynamique est largement portée par les politiques de transition énergétique, l'augmentation des capacités photovoltaïques installées et la volonté de renforcer l'autonomie industrielle dans des secteurs stratégiques tels que les batteries, les semiconducteurs et les technologies bas carbone.

Si les semiconducteurs représentent seulement quelques pourcents des volumes de silicium consommés, ils concentrent une part disproportionnée de la valeur ajoutée. La demande mondiale en microprocesseurs, par exemple, est passée d'environ **111 milliards de dollars en 2021** à une projection de près de **164 milliards de dollars en 2030**. Derrière cette croissance se trouvent l'intelligence artificielle, les centres de données, les objets

connectés, les réseaux de télécommunication et les véhicules électriques, tous dépendants de puces fabriquées à partir de silicium de grade électronique.

Le photovoltaïque constitue cependant l'un des moteurs les plus spectaculaires de la demande actuelle. La production mondiale de panneaux solaires continue de battre des records, entraînant une consommation croissante de silicium de grade solaire. Cette évolution est directement liée aux objectifs de décarbonation adoptés par de nombreux pays, qui misent sur l'énergie solaire comme l'un des piliers de leur transition énergétique.

Pourrions-nous faire face à une crise du silicium ?

A priori, cette idée d'une crise du silicium, pourtant évoquée par certains médias, peut sembler surprenante. Après tout, le silicium est le second élément le plus abondant de la croûte terrestre et on le retrouve sur tous les continents. Contrairement à certains métaux stratégiques comme le lithium, le cobalt ou les terres rares, **le problème n'est donc pas l'épuisement de la ressource elle-même**.

La véritable crainte provient de **l'accès à des formes exploitables de silicium et de la capacité industrielle à la transformer**. En effet, ceci requiert des installations industrielles complexes, une grande quantité d'énergie et des chaînes d'approvisionnement hautement spécialisées. La difficulté réside donc moins dans la disponibilité géologique de la matière première que dans les **infrastructures nécessaires à sa purification**.

Cette dépendance a été rendue publique en 2021 quand plusieurs provinces chinoises ont décidé de réduire leur consommation électrique afin d'atteindre leurs objectifs énergétiques. La production de silicium métallurgique a alors fortement ralenti, chutant de plus de 90%, ce qui a provoqué une hausse brutale des prix de +300% sur les marchés internationaux.[30] Ceci a démontré que la chaîne de valeur mondiale du silicium pouvait être rapidement impactée par des perturbations locales.

A cela s'ajoute une autre pression à savoir l'explosion de la demande, notamment en Europe. La transition énergétique repose

largement sur le déploiement massif de panneaux photovoltaïques, tandis que la transition numérique accroît les besoins en composants électroniques. Autrement dit, **les deux grandes transformations technologiques du 21ème siècle dépendent fortement d'un même élément chimique** pour lequel l'Europe devient dépendante de la Chine.

Recycler les déchets contenant du silicium pour lever notre dépendance à la Chine ?

Lorsqu'un pays dépend fortement d'un acteur extérieur pour un matériau stratégique, la question de la souveraineté industrielle se pose rapidement. Dans le cas du silicium, largement utilisé dans les panneaux photovoltaïques et les composants électroniques, cette dépendance est souvent associée à la Chine, qui concentre aujourd'hui une part dominante des capacités mondiales de raffinage et de production.

Dans ce contexte, le recyclage apparaît spontanément comme une solution évidente. L'idée est simple. Elle consiste à récupérer le silicium contenu dans les panneaux solaires ou les déchets électroniques afin de réduire les importations de matière première. Cette logique d'**économie circulaire** est déjà bien développée pour certains métaux critiques comme le cuivre ou l'aluminium.

Pour le photovoltaïque, une filière de recyclage structurée existe déjà en Europe, rendue obligatoire par la directive européenne DEEE (Déchets d'équipements électriques et électroniques). [31] Aujourd'hui, plus de 95 % de la masse d'un panneau solaire est effectivement récupérable (verre, aluminium, plastiques et cuivre), mais la situation est loin d'être aussi prometteuse pour le silicium. Celui-ci s'est en effet dégradé lors de sa mise en œuvre et de son usage, et ces altérations rendent sa réutilisation directe extrêmement difficile pour fabriquer de nouvelles cellules à haut rendement.

En pratique, les procédés actuels permettent surtout de récupérer du silicium **sous forme de matière secondaire**, à la pureté altérée, qui doit ensuite repasser par des étapes lourdes de purification et de refusion. Or, atteindre les niveaux de pureté requis pour le photovoltaïque (≈ 99,999 %) ou pour l'électronique (jusqu'à

99,9999999 %) nécessite des procédés industriels très énergivores, proches de ceux utilisés à partir de matière première vierge. Ainsi, même si l'Europe dispose d'une capacité croissante de recyclage des panneaux photovoltaïques ou de composants électroniques, le silicium recyclé ne remplace pas encore le silicium primaire dans les chaînes de production. Il constitue plutôt une source complémentaire, réinjectée dans des usages moins exigeants ou réaffinée dans des installations spécialisées.

Quel avenir pour le silicium ?

Il est donc acquis que l'avenir du silicium sera en grande partie géopolitique. La Chine, à la fois grande productrice et grande consommatrice, exerce déjà une influence majeure sur l'ensemble de la chaîne de valeur. Il est également établi que le recyclage, malgré son intérêt environnemental, ne permettra pas à lui seul d'assurer une véritable autonomie matérielle à l'Europe.

Le silicium devrait **conserver une place centrale dans les technologies du 21ème siècle**. Malgré les limites physiques rencontrées par la miniaturisation des composants électroniques, il demeure aujourd'hui le matériau de référence de la microélectronique mondiale. Sa stabilité chimique, la qualité exceptionnelle de son oxyde naturel et la maturité des procédés industriels développés depuis plus d'un demi-siècle en font un candidat difficile à remplacer à grande échelle. La situation est comparable dans le domaine de l'énergie solaire. Les cellules photovoltaïques à base de silicium représentent aujourd'hui plus de 90 % du marché mondial et continuent de progresser grâce à de nouvelles architectures de cellules et à l'association avec d'autres matériaux. Les innovations les plus prometteuses reposent d'ailleurs souvent sur des dispositifs hybrides où le silicium constitue toujours la base de la conversion photovoltaïque.

L'enjeu principal ne réside donc pas dans la recherche d'un remplaçant immédiat au silicium, mais dans l'**amélioration continue des systèmes qui l'utilisent** afin d'augmenter leurs performances, leur efficacité énergétique et leur durabilité. Une autre question majeure concerne l'**organisation mondiale de sa production et de sa transformation**, aujourd'hui fortement concentrée en Asie-Pacifique.

Dans les décennies à venir, la demande devrait continuer à croître sous l'effet conjoint de la transition numérique et de la transition énergétique. L'essor de l'intelligence artificielle, des centres de données, des réseaux de communication, des véhicules électriques et du photovoltaïque nécessitera des quantités toujours plus importantes de silicium de haute qualité. Le défi ne sera donc probablement pas de trouver du silicium, mais de disposer des capacités industrielles, énergétiques et technologiques nécessaires pour le transformer aux niveaux de pureté exigés par ces applications.

Finalement, le paradoxe du silicium est peut-être là. Cet élément, omniprésent dans les roches et les sables de la planète, semble pratiquement inépuisable. Pourtant, les formes les plus utiles à notre société sont le résultat de procédés industriels parmi les plus sophistiqués jamais développés. Plus que la ressource elle-même, c'est donc la maîtrise de sa transformation qui constituera l'un des enjeux stratégiques des prochaines décennies.

Dans ce trajet qui mène du minéral au numérique, le silicium conserve une part d'imaginaire héritée de la science-fiction : celle d'une matière capable, peut-être, de porter des formes d'intelligence encore à inventer.

Vous souhaitez plus d'informations sur ce sujet ?

N'hésitez pas à me contacter via l'adresse email suivante: a.richel@uliege.be ou via le formulaire disponible en cliquant ici.

Références et commentaires

[1] https://www.radiofrance.fr/franceculture/quand-l-ecrivain-de-science-fiction-isaac-asimov-predisait-le-futur-6745862

[2] https://www.smithsonianmag.com/air-space-magazine/silicon-based-life-staple-science-fiction-may-not-be-likely-after-all-180975083/

[3] https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7345352/

[4] https://www.sciencesetavenir.fr/espace/vie-extraterrestre/et-s-il-e

xistait-une-autre-forme-de-vie-dans-l-univers-basee-sur-le-silicium_173630ivers-basee-sur-le-silicium_173630

[5] https://periodic-table.rsc.org/element/14/silicon

[6] https://cordis.europa.eu/article/id/31381-research-shows-diatomic-ability-to-process-silicon/fr

[7] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825214001779

[8] https://www.nature.com/articles/srep35832

[9] https://www.science-et-vie.com/article-magazine/une-autre-vie-est-elle-possible

[10] https://lweb.cfa.harvard.edu/~ejchaisson/cosmic_evolution/docs/fr_1/fr_1_future5.html

[11] https://www.encyclopedie-environnement.org/en/physics/silicon-age/

[12] https://www.simplyscience.ch/fr/jeunes/decouvre/clair-comme-du-cristal-comment-du-sable-se-transforme-en-verre

[13] https://www.nature.com/articles/483S43a

[14] https://www.computerhistory.org/siliconengine/semiconductor-diode-rectifiers-serve-in-ww-ii/

[15] https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/ema3.70020

[16] https://ieeexplore.ieee.org/document/1296014

[17] https://www.historyofinformation.com/detail.php?id=723

[18] https://www.smithsonianmag.com/smart-news/silicon-valley-owes-its-s

uccess-tech-genius-youve-never-heard-180961395/

[19] https://www.universalis.fr/encyclopedie/circuits-integres/4-histoire-des-circuits-integres/

[20] https://computerhistory.org/stories/silicon-valley/

[21] https://www.pveducation.org/zh-hans/pvcdrom/refining-silicon

[22] Cet article ne mentionne pas l'émergence de la silicose et les impacts sanitaires liés à la manipulation de particules fines de silice. Les personnes intéressées par le sujet peuvent consulter ce lien qui donne des explications accessibles et exhaustives sur le sujet : https://www.passeportsante.net/fr/Maux/Problemes/Fiche.aspx?doc=silicose-sur-maladie-mineurs

[23] https://www.sino-stargroup.com/news/what-are-the-different-grades-of-silicon-metals.html

[24] https://criticalstrategicmetals.com/minerals/silicon/price/

[25] https://www.mdpi.com/1996-1073/19/9/2023

[26] https://fr.scribd.com/document/863311531/Chapitre-2-module-TFCI

[27] https://cordis.europa.eu/article/id/460617-eco-efficient-silicon-processing-for-a-circular-economy

[28] https://www.acumenresearchandconsulting.com/silicon-market

[29] https://www.mineralinfo.fr/fr/ecomine/silicium-un-element-chimique-tres-abondant-un-affinage-strategique

[30] https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/E-9-2021-005540_FR.html

[31] https://environnement.wallonie.be/home/gestion-environnementale/dechets/categories-de-dechets-ressources/dechets-soumis-a-rep/panneaux-photovoltaiques.html