Bonjour à tous et bienvenue dans ce quatrième épisode sur l'énergie où on va parler de l'utilisation directe de l'énergie solaire. En fait, on va parler plus particulièrement des panneaux photovoltaïques. Comme d'habitude je vais tenter de faire une vidéo récapitulative objective sur le sujet. En gros, la vidéo que j'aurais aimée trouver en démarrant mes recherches sur le solaire avec les bonnes clefs de lecture pour pouvoir me faire un avis sur la question: "est-ce que le photovoltaïque est un moyen crédible de produire de l'électricité". Si vous voulez des tutos pour installer un panneau sur votre toit, il y a de nombreuses autres vidéos sur Youtube qui en parle et vous trouverez votre bonheur ailleurs. J'en profite pour vous dire que je me lance sur Tipeee alors si vous appréciez cette chaîne et que vous souhaitez continuer de voir régulièrement des vidéos, vous pouvez maintenant me soutenir financièrement!

Au coeur du soleil a lieu des réactions nucléaires qui produisent un rayonnement électromagnétique. De l'énergie radiative traverse donc le vide pour arroser généreusement la Terre. Sans cette énergie, il n'y aurait pas grand chose sur Terre. Le rayonnement solaire représente plus de 99,9% de la puissance reçue par le système Terre.

Et ça représente beaucoup d'énergie ?

Oh oui... ça représente une quantité d'énergie faramineuse. C'est la bonne nouvelle. Le rayonnement qui atteint le haut de l'atmosphère est de 174 milliers de milliards de watts. 30% de ce flux d'énergie est directement réfléchi. On a déjà parlé de tout ça dans la vidéo sur le bilan radiatif et je vous y renvoie si vous voulez revoir ça en profondeur. Ce sont ces flux d'énergie qui expliquent la température moyenne de notre planète.

Des milliers de milliards de watts c'est une puissance énorme ! Mais tu m'as déjà dit de me méfier... La différence entre énergie et exergie et tout ça.

C'est bien, je vois que tu as retenu la leçon de la première vidéo. Effectivement, avoir de l'énergie ne suffit pas, il faut qu'elle soit de suffisamment bonne qualité pour qu'on puisse l'utiliser pour en faire quelque chose.. Et c'est la seconde bonne nouvelle. Le Soleil et ses 5500°C nous envoie fort heureusement une énergie de grande qualité. Même en terme d'exergie, on s'en sort donc très bien. En fait si on arrivait à récupérer tout ça, il faudrait une heure de ce que le soleil apporte au sommet de l'atmosphère pour alimenter toute l'humanité en énergie pendant un an.

Voilà la vidéo est finie... Avec tout ça on est tranquille. Franchement tu n'aurais pas pu commencer par ce sujet plutôt que nous faire flipper avec les problèmes environnementaux.

C'est parfois le discours que l'on peut entendre. Pourtant la présence de ce gros flux d'exergie n'implique pas qu'on puisse le récupérer... Jusque là, on s'est plutôt contenté d'en récupérer une partie indirectement via l'éolien, l'hydroélectrique, la biomasse et surtout les combustibles fossiles. Pour l'instant, l'exploitation directe de l'énergie solaire ne fournit même pas 1% de l'énergie utilisée par l'humanité.

Mais attends c'est pas partout pareil. Les pays plus ensoleillés ont accès à beaucoup plus d'énergie non ?

Effectivement. Une bonne partie de la différence d'ensoleillement vient de l'inclinaison entre le sol et le rayonnement solaire incident. L'idéal, c'est que ce rayonnement soit perpendiculaire, ce qui est le cas au niveau de l'équateur. Plus on s'en éloigne et plus l'ensoleillement diminue. Mais, il faut prendre en compte un second facteur important: la couverture nuageuse. Et vu qu'il y a beaucoup de nuages au niveau de l'équateur, ce n'est paradoxalement pas ici qu'il y a le meilleur potentiel.

Okay si on prend tout ça en compte, on a une idée du potentiel des différentes zones ?

Oui, ici vous pouvez voir une carte qui montre l'ensoleillement en kWh par mètre carré et par an et pour rappel on avait dit qu'une maison de 75 mètres carré avec chauffage avait besoin d'environ 9000 kWh par an. Le potentiel solaire n'est pas du tout négligeable par rapport à nos besoins on voit que la répartition du potentiel solaire n'est pas une simple décroissance depuis l'équateur et surtout il y a du soleil partout ce qui est un énorme avantage. Utiliser l'énergie solaire est donc une excellente idée dans les endroits où il n'y a pas de réseau électrique. On voit également que certaines régions du monde reçoivent également beaucoup plus d'énergie que d'autres et même si on regarde la France, il y a d'importantes disparités.

Et comment fait-on pour récupérer cette énergie ?

Avant, j'aimerais rappeler l'évidence. On peut déjà récupérer cette énergie directement, sans rien faire. Quand le soleil brille, on n'a pas besoin d'allumer la lumière et quand les rayons du soleil viennent réchauffer notre maison, on n'a pas besoin de chauffage. La façon la plus efficace d'exploiter l'énergie solaire est d'avoir une maison bien conçue, bien orientée pour récupérer la lumière et la chaleur du soleil. Tout commence là.

Oui et bien isoler pour pas laisser filer toute la chaleur... Okay on s'en doute. Mais comment fait-on pour récupérer directement l'énergie solaire ?

Il existe plusieurs techniques différentes pour récupérer l'énergie solaire. Ici, on va parler des panneaux solaires photovoltaïques et on verra le reste dans une autre vidéo. Le photovoltaïque porte bien son nom puisqu'il convertit directement la lumière, "photo" en grec, en électricité, "voltaïque" faisant référence au physicien italien Alessandro Volta, pionnier dans la recherche sur l'électricité. On passe donc d'une énergie radiative, celle associée au rayonnement solaire, à une énergie électrique.

Et comment on passe de l'énergie radiative à l'énergie électrique?

Et bien ça dépend des technologies et il y en a beaucoup. Dans cette vidéo, on va se concentrer sur les technologies à base de silicium parce qu'elles constituent la majorité des installations existantes et la majorité de celles qu'on installe. C'est également les technologies qui sont considérées dans des scénarios comme celui de l'Ademe, 100% renouvelables.

Okay bah du coup explique moi comment ça marche les panneaux photovoltaïques en silicium.

Lorsque l'on expose un semi-conducteur comme le silicium à de la lumière, certains électrons sont arrachés aux atomes de silicium et laisse un trou derrière eux. Si rien n'est fait un trou se recombine avec un électron pour revenir à l'état initial. Dans une cellule photovoltaïque on souhaite éviter cette recombinaison et donc forcer les électrons dans une direction, les trous dans une autre ce qui va créer un courant électrique. Pour y arriver on va créer ce qu'on appelle une jonction PN . Pour cela on assemble deux couches une dotée P et l'autre N. Dans la couche P qui est généralement en dessous certaines impuretés sont ajoutées comme des atomes de Bore pour la rendre moins riche en électrons et donc les attirer . Dans la couche N c'est l'inverse on va ajouter des atomes riches en électrons comme le phosphore qui vont augmenter le nombre d'électrons. Au niveau de la jonction entre les deux couches, les électrons ne peuvent pas passer il suffit ensuite d'ajouter des contacts des deux côtés de la cellule en silicium. Quand on illumine cette cellule, les charges négatives s'accumulent dans la couche N et les charges positives dans la couche P. Il suffit de mettre les deux en contact pour obtenir un courant électrique. Les cellules photovoltaïques sont en plus recouvertes d'une couche anti-reflet pour maximiser l'absorption de la lumière par la cellule.

Et ça convertit tout le rayonnement solaire en électricité ?

Cette cellule va convertir le rayonnement solaire en électricité y compris une partie des rayonnements infrarouges et ultraviolets et pas seulement le visible mais on ne va évidemment pas tout récupérer ,on reparlera du rendement un peu plus loin.

Et ce que tu appelles une cellule... C'est un panneau photovoltaïque ?

Non mais c'est son constituant le plus important. Un panneau photovoltaïque est un empilement de différentes couches. La première c'est une plaque de verre avec un traitement anti-reflet. Ensuite, il y a une couche barrière qui protège les cellules de l'oxygène et de l'eau qui participent à leur dégradation. Sous cette couche, on trouve les cellules photovoltaïques soudées en série, typiquement une soixantaine. On forme donc un mille-feuille solide maintenu par un cadre en aluminium. Un panneau classique fait 1,60m de long, 1m de large et pèse autour de 25 kg. Ce panneau photovoltaïque sera capable de subir les intempéries pendant plusieurs années. Et si vous voulez voir une vidéo qui montre l'assemblage d'un panneau photovoltaïque, je vous renvoie à celle qu'a fait Ecovertec

Et est-ce qu'on sait pendant combien de temps ce panneau va fonctionner ?

Les panneaux photovoltaïques actuellement commercialisés garantissent 30 ans de durée de vie en se basant sur des expériences de vieillissement accéléré en laboratoire. Le rendement des cellules photovoltaïques se dégrade légèrement au fil du temps. De plus, étant continuellement exposés aux intempéries, ils peuvent finir pas s'abimer. Les panneaux photovoltaïques ne se réparent pas vu que les différentes couches sont fusionnées entre elles. Ils peuvent continuer à vivre au-delà de leur garantie mais c'est assez dur de se prononcer vu qu'il faudrait attendre trente ans avant d'en avoir le coeur net. Dans le reste de la vidéo, on s'appuiera sur des données qui considèrent 30 ans pour la durée de vie des panneaux.

Et ce panneau une fois qu'il est foutu on peut le recycler ?

Oui. Les panneaux dont on parle ont besoin d'un cadre en aluminium, de verre, de plastique, de cellules en silicium, de cuivre et d'argent pour conduire l'électricité. En théorie, tout là-dedans peut-être récupéré et recyclé si les filières sont mises en place. Parmi ces composants, le seul qui peut créer des soucis c'est l'argent. Le photovoltaïque est déjà responsable de 8% de la consommation mondiale alors qu'il ne fournit même pas 1% de l'énergie utilisée dans le monde. Notre capacité à extraire suffisamment d'argent pourrait rapidement devenir une limite. La recherche scientifique consciente du problème cherche déjà des substituts. Le reste des matériaux sont abondants et recyclables. Ce qui est une des grandes forces des technologies à base de silicium.

Mais tu as dit que toutes les couches étaient collées ensemble, ça rend pas le truc galère?

Une fois le cadre en aluminium retiré, on peut brûler le plastique pour séparer le verre des cellules photovoltaïques. Les cellules sont traitées chimiquement pour récupérer les contacts métalliques puis le silicium peut-être refondu pour former d'autres cellules. L'aluminium et le verre se recyclent également. Le taux de récupération des composants est estimé à près de 90%. Les panneaux photovoltaïques à base de silicium se recyclent donc bien, pour les différents types de cellules, qu'elles soient constituées de silicium monocristallin ou polycristallin.

Attends parce qu'il y a deux trucs différents dans les panneaux dont on parle ?

Oui, on voit clairement sur les cellules photovoltaïques les différences entre le polycristallin où plusieurs cristaux sont visibles et le monocristallin qui est uniforme. Les panneaux sont également facilement différenciables. Ceux en silicium polycristallin sont bleus alors que ceux mono sont noirs. On verra un peu plus loin les différences entre ces panneaux mais il est utile de savoir que l'efficacité d'un panneau photovoltaïque décroît avec la température. Pour du silicium, on perd autour de 0.5% de l'efficacité par degré. Du coup, les polycristallins sont avantagés dans les régions chaudes parce qu'ils sont plus clairs et donc chauffent moins.

Cool maintenant, quand j'en verrais sur les toits je pourrais les reconnaître !

Mais, attention. Tous les panneaux sur les toits ne sont pas nécessairement photovoltaïques. Il y a aussi des panneaux solaires thermiques dont on parlera dans la prochaine vidéo sur l'énergie. Et puis, on peut en mettre sur les toits mais on en fait aussi de grands parcs photovoltaïques. La plus grosse centrale photovoltaïque de France est située près de Bordeaux et couvre une superficie de 2,6 km² pour une production prévue de 350 GWh, moins d'un millième de l'électricité produite en France.

Ah ouais, je me rendais pas compte que c'était aussi énorme en fait.

L'espace qu'ils prennent est une critique que l'on peut entendre. Dans le désert on ne gêne personne mais la poussière peut très rapidement faire baisser la production et il faut les nettoyer régulièrement. Ailleurs que dans le désert, ils prennent la place d'autres activités. Pour l'éolien, on avait vu que les éoliennes n'empêchaient pas de faire de l'agriculture entre

donc ça ne prenait pas trop de place au sol. Je vais utiliser les données de ce parc photovoltaïque pour faire quelques calculs rapides. Si on prend l'exemple d'une centrale nucléaire qui produit 8 TWh, il faudrait un parc photovoltaïque avec les mêmes caractéristiques que celui de Bordeaux mais d'environ 60 km² pour la remplacer. Pour produire toute l'électricité de France, sans considérer les problèmes de perte de stockage... etc, il faudrait autour de 4000 km², en gros entre 0.5 et 1% du territoire français recouvert de panneaux.

Okay, donc ça prend quand même un peu de place. Pourquoi on se contente pas des toits du coup ?

Les parcs photovoltaïques présentent une meilleure économie d'échelle et facilitent la gestion de l'électricité. En plus les parcs permettent d'optimiser la position et l'orientation des panneaux photovoltaïques. Les panneaux sont souvent dotés de module d'orientation à un ou deux axes pour suivre le soleil et augmenter au maximum la production électrique. La plupart des scénarios considère les deux. Pour avoir un point de repère. Le scénario 100% renouvelable de l'ADEME estime que les $\frac{2}{3}$ de l'électricité provenant du photovoltaïque seraient produits par du photovoltaïque au sol contre $\frac{1}{3}$ sur les bâtiments.

Donc, en mettre sur son toit, ça a quand même un intérêt ?

Oui, ici ils ne gênent personne ! Dans la vidéo sur l'éolien, on avait vu que l'électricité produite était proportionnelle au carré de la taille de la pale de l'éolienne et au cube de la vitesse du vent. Ce qui rendait les petites éoliennes domestiques peu utiles. L'électricité produite par le photovoltaïque est juste proportionnelle à la surface de panneaux. Ce qui en fait un bon candidat pour les usages domestiques. Il vaut mieux avoir des panneaux sur son toit qu'une petite éolienne dans son jardin.

Mais un panneau sur son toit ça fournit de l'électricité de façon intermittente... En fait on a le même problème que pour l'éolien sur ce point là.

Oui. Même problème que l'éolien. En particulier, le photovoltaïque ne produit pas la nuit et c'est à ce moment qu'on a besoin d'allumer les lumières... Des panneaux photovoltaïques vont produire que quand ils sont exposés au soleil. Du coup, la puissance maximum n'est atteinte que quand le panneau est parfaitement face au soleil à midi en plein été. Le photovoltaïque produit moins en hiver qu'en été. Ce qui est un inconvénient dans les pays tempérés où la demande est plus forte en hiver. Par contre, le photovoltaïque corrèle bien avec les besoins de climatisation.

Mais pour l'éolien c'était l'inverse non ? Plus de vent l'hiver.

Exact. Le solaire et l'éolien offrent donc une bonne complémentarité à l'échelle saisonnière. Et il faut noter également que dans des conditions anticycloniques, il n'y a pas de vent... Mais il n'y a pas nuage non plus et donc il y a du soleil ! Même si vous pouvez avoir ni vent, ni soleil ou les deux en même temps, le solaire et l'éolien présentent une complémentarité intéressante. Il est tout de même important de noter que les panneaux photovoltaïques ont

un des facteurs de charge les plus bas de tous les moyens de production d'électricité.

On en a déjà parlé pour l'éolien. C'est le rapport entre l'électricité que tu obtiens réellement et l'électricité que tu obtiendrais si le panneau photovoltaïque fonctionnait toujours à pleine puissance. On a déjà dit que pour l'éolien c'était autour de 25% en France et pour le nucléaire autour de 75%. Et bien le solaire, en France, tombe à 13%. En gros il faut installer 2 MW de puissance photovoltaïque pour fournir autant d'électricité sur une année qu'un MW d'éolien et plus de 5 MW de solaire pour fournir autant d'électricité qu'un de nucléaire. On ne peut pas se contenter de regarder la puissance installée. Il faut prendre en compte les facteurs de charge pour avoir une idée de l'électricité produite quand on compare plusieurs filières.

Maintenant que j'ai bien compris ce qu'est qu'un panneau photovoltaïque ce qui m'intéresse c'est de savoir si c'est rentable énergétiquement.

Pour ça, il va falloir qu'on regarde le taux de retour énergétique.

Pour un panneau photovoltaïque, c'est l'énergie que va fournir ce panneau pendant sa durée de vie sur l'énergie que le panneau photovoltaïque aura coûté. Si ce taux de retour énergétique est inférieur à 1... Et bien le système demande plus d'énergie qu'il n'en fournit, c'est donc un puits d'énergie au lieu d'être une source.

Et je suppose qu'on ne fait jamais ça.

Si, dans certains cas, ça peut avoir un intérêt. Les panneaux solaires qu'on installe sur des satellites peuvent très bien avoir demandé plus d'énergie qu'ils n'en fourniront. On a donc investi une énergie qui ne sera jamais remboursée pour remplir un but spécifique. En revanche, pour fournir de l'énergie à nos sociétés, il nous faut un taux de retour énergétique de bien plus de 1.

Et Pourquoi pas juste plus de 1 ? Une fois qu'on a plus de 1, c'est rentable physiquement de le mettre en place non ?

Nos sociétés industrielles se sont construites sur des ressources énergétiques avec un très bon taux de retour énergétique le charbon a 80 ,le pétrole est passé en dessous de 20 récemment mais était plus élevé pendant la majeure partie de son exploitation, d'ailleurs une des grosse limites des pétroles non conventionnels c'est leur faible taux de retour énergétique et on en a parlé dans la vidéo sur le pic pétrolier. Les spécialistes sur ces questions s'accordent sur le fait qu'un haut taux de retour énergétique est très important pour le maintien de nos sociétés industrielles mais ils ne donnent pas les mêmes chiffres. Pour avoir une idée on peut tracer le pourcentage d'énergie que reçoit nos sociétés en fonction du taux de retour énergétique. On voit sur cette figure que si vous avez un taux de retour énergétique de deux, la moitié de l'énergie produite par le système est consommée par le système lui même. Au dessus de dix la part qu'utilise le système est faible. Certains considèrent qu'à partir de trois on a un moyen d'extraire l'énergie qui est viable. D'autres

préfèrent monter à 7, 8 mais je pense que cette figure permet de bien comprendre le problème des faibles taux de retour énergétique. Si c'est trop faible on immobilise trop de matière, de place de travail et de moyens financiers dans la structure d'extraction d'exergie Et nos sociétés fortement consommatrices d'exergie ne peuvent pas s'en contenter.

Okay, l'importance du taux de retour énergétique est clair. Et du coup, comment les panneaux photovoltaïques s'en sortent ?

Pour calculer le taux de retour énergétique des panneaux photovoltaïques il faut connaître l'énergie collectée pendant toute la durée de vie du panneau et l'énergie utilisée pour le produire pour répondre à cette question je vais largement m'appuyer sur un bon papier scientifique qui résume bien la situation . Pour commencer on voit qu'en 2013 la puissance installée est dominée par le silicium polycristallin pour plus de moitié et par le silicium monocristallin pour un tiers.

Et les trois autres technologies c'est quoi ?

C'est la seconde génération de panneaux photovoltaïques qui comme tu peux le voir est beaucoup moins répandues. Il s'agit de panneaux photovoltaïques en couches minces. Les films souples sont le plus souvent appliqués directement sur une vitre ou une plaque métallique. L'épaisseur de cette couche n'est que de quelques micromètres. L'article examine trois technologies de couche mince, le silicium amorphe, CIGS et CdTe. CIGS est un sigle pour les métaux utilisés: cuivre, indium, gallium et sélénium. Les cellules de CdTe sont, elles, composées de cadmium et de tellure. Même si je ne vais pas détailler ce point, on peut noter que ces cellules fonctionnent différemment que celles au silicium. Cette deuxième génération de panneaux photovoltaïques est minoritaire.

On va d'abord jeter un coup d'oeil à l'énergie nécessaire pour produire un panneau photovoltaïque. Sur la partie gauche, on voit qu'il faut bien plus d'énergie pour produire les panneaux photovoltaïques à base de silicium monocristallin que les polycristallins. On voit aussi que les technologies de film mince demandent bien moins d'énergie. Le silicium polycristallin est obtenu à partir du quartz moyennant une importante dépense d'énergie. A l'échelle industrielle, il est formé en barres de 1,20 m de largeur et 2 m de long. Ce silicium polycristallin peut ensuite être tranché pour fournir l'élément de base des panneaux photovoltaïques. Ce silicium polycristallin peut également être fondu dans le processus de formation du silicium monocristallin. A la fin de ce processus, on obtient un seul cristal de silicium qui peut faire jusqu'à deux mètres de haut. On comprend bien pourquoi le silicium monocristallin demande plus d'énergie, il a besoin d'une étape supplémentaire et pas des moindres vu qu'il faut fondre le silicium. Cependant au fil des années, des économies ont été faites. D'une part en diminuant l'épaisseur de silicium nécessaire, autour de 0.2mm aujourd'hui et d'autre part en limitant les pertes pendant la découpe de la matière première.

Pour le silicium amorphe, le gain vient de l'épaisseur de silicium. Le silicium amorphe est le plus souvent déposé sous forme de plasma sur un substrat comme du verre, du plastique ou du métal préalablement recouvert d'une couche transparente et conductrice. L'épaisseur de silicium est de l'ordre du micromètre et le film formé est souple ce qui permet des usages que ne permettent pas les panneaux photovoltaïques rigides. On voit également que les deux autres technologies de films minces s'en sortent bien. Sur la droite, on voit l'énergie

associée à l'installation qui n'est pas directement le panneau. On aura par exemple les fixations et les câblages. On connaît maintenant l'énergie nécessaire pour produire un panneau.

Et il nous faut donc l'énergie produite par ce panneau.

Pour harmoniser les résultats, l'étude considère un ensoleillement de 1700 kWh par m², une durée de vie de 30 ans et un ratio de performance de 75%. Le ratio de performance est là pour prendre en compte l'écart entre la théorie et ce qu'on récupère réellement. Pour calculer l'électricité produite par le panneau sur sa durée de vie, il nous manque plus que le rendement. Le rendement c'est la part de l'énergie radiative incidente qui est convertie en électricité en considérant tout le spectre solaire et une incidence normale. On voit que ces rendements sont plus ou moins proches du rendement théorique suivant les technologies.

On voit surtout une grosse différence entre le rendement sur le terrain et puis le maximum en laboratoire... C'est fou.

Effectivement la différence est importante et il y a plusieurs raisons. Le but d'un laboratoire est de booster au maximum ce chiffre et on a donc un instantané. ça ne veut pas dire que ce rendement peut durer longtemps. Or, quand on vous vend un panneau c'est pour trente ans et ce qui vous intéresse ce n'est pas le rendement au moment où vous l'installez mais sur sa durée de vie. Ensuite, le laboratoire obéit à sa propre logique de construction et peut se permettre de dépenser beaucoup sur une cellule. Passer le procédé au niveau industriel implique un certain nombre de compromis pour pouvoir fabriquer en masse des cellules peu chères. On voit cependant que ces rendements augmentent avec le temps.

Et maintenant on a tout pour calculer notre taux de retour énergétique ! Alors est-ce qu'on retombe sur nos jambes ?

Ce papier nous montre un taux de retour énergétique qui dépend des technologies mais qui est vraiment pas mal. On voit que les panneaux au silicium qui sont les plus répandus ont un taux de retour énergétique de plus de 8. Dans le milieu du photovoltaïque, on préfère parler du temps qu'il faut à un panneau pour fournir autant d'énergie qu'il en a fallu pour le concevoir. Un taux de retour énergétique autour de 10 veut dire qu'il faut environ trois ans de fonctionnement d'un panneau pour rembourser l'investissement initial en énergie alors que dans les années 2000 il fallait une dizaine d'années. L'amélioration du taux de retour énergétique au fil du temps est une tendance lourde et des études scientifiques prévoient que la tendance continue sur cette voie.

Je comprends bien mieux la question maintenant. Il faut garder en tête l'énergie utilisée pour fabriquer et installer ces panneaux, on ne peut pas juste croire que c'est de l'électricité gratuite. En fait des panneaux photovoltaïques c'est plutôt un investissement énergétique.

Tout à fait ! Il faut TOUJOURS se demander si on rembourse l'investissement initial et à quelle vitesse.

Et du coup avec de bons taux de retour énergétique, on est tranquille !

Oui ! Mais il faut garder quelques points en tête. Déjà, on a dit que ces chiffres sont valables pour un ensoleillement de 1700 kWh par m². Or, si tu es dans une région avec moins de soleil, les coûts énergétiques de la production ne changent pas. En revanche, l'électricité produite est proportionnelle à l'ensoleillement et va donc diminuer avec lui. La France dispose d'une centrale solaire photovoltaïque en Lorraine où il y a plutôt un ensoleillement de 1100 kWh par m². La technologie installée est celle à base de cadmium et tellure. L'article donne un taux de retour énergétique de 34 pour 1700 kWh par m² d'ensoleillement, il tombe à 22 si on a que 1100. Evidemment, si on était dans une région avec plus de 1700 kWh par m², le taux de retour énergétique serait encore meilleur que celui donné par l'article. D'ailleurs, tu peux trouver sur internet des estimations de l'ensoleillement dans ta région et calculer le taux de retour énergétique correspondant.

Donc en gros... plus il y a de soleil où tu installes ton panneau... plus le taux de retour énergétique est bon. Je dois t'avouer que je ne suis pas spécialement surpris par ça.

Okay... Mais il faut garder ça à l'esprit. L'ensoleillement ne change rien aux coûts énergétiques mais joue pas mal sur les gains... Un autre truc qui joue, c'est ce qu'on considère dans l'énergie qui a été nécessaire à la production et à l'installation de ces panneaux photovoltaïques. Suivant les études une partie des coûts énergétiques est ignorée, le plus souvent parce qu'on n'en a aucune idée comme le transport, l'entretien ou le recyclage. La plupart de ces études ne considère pas les renforcements du réseau électrique ou la production de batteries qui peuvent être mises en place pour pallier au caractère intermittent du rayonnement solaire.

Et pourquoi c'est pas pris en compte?

Et bien parce que ces surcoûts énergétiques dépendent beaucoup de la situation dans laquelle les panneaux sont installés. Si, le réseau électrique est capable d'intégrer les énergies intermittentes et dispose déjà de capacité de stockage, il n'y a pas besoin de rajouter de l'infrastructure et les taux de retour énergétique donnés sont bons. Mais, si il faut renforcer la grille électrique et ajouter du stockage pour rendre viable l'installation photovoltaïque, il faudrait le considérer dans le calcul du taux de retour énergétique et ça va naturellement le faire diminuer. On regarde donc ici plutôt un maximum dans le cas où le réseau électrique est capable de supporter l'intermittence. Et on a déjà vu qu'hors grosse capacité hydroélectrique, ce n'est que rarement le cas. Je pense creuser cet aspect fondamental dans la vidéo sur le réseau et celle sur le stockage et on en reparlera à ce moment là. En tous cas, c'est aussi quelque chose qu'il faut garder à l'esprit. Une installation intermittente peut être rentable énergétiquement prise seule mais ne plus l'être quand on considère ce qui doit être construit avec. Et sur cet aspect, les panneaux photovoltaïques ont moins de marge que les éoliennes avec un taux de retour énergétique plus faible même si il est, encore une fois, tout à fait correct.

Y a trop d'aspects sur cette question de l'énergie... Franchement c'est chaud.

Effectivement et je m'y perds également un peu aussi mais j'essaye de faire remonter les points pertinents pour avoir une idée claire de cette question.

Bah justement, y a des trucs qui sont pas trop clairs. Tu as dit qu'on s'intéressait plutôt aux

technologies à base de silicium... Mais là, on voit bien que les couches minces s'en sortent mieux. Alors pourquoi on considère pas celles là ? T'as pas raté quelque chose ?

Elles ont un meilleur taux de retour énergétique mais constituent moins de 10% du marché et il y a de bonnes raisons de penser que les panneaux en silicium cristallin resteront majoritaires. Et il y a d'autres points problématiques avec les technologies CIGS et CdTe. Dans la technologie CIGS, l'indium est une composante essentielle de nos écrans tactiles et la production mondiale est déjà largement siphonnée par ces usages. Si l'indium est aujourd'hui problématique, on peut penser que ce sera une sérieuse limite au développement à grande échelle de panneaux photovoltaïques qui reposerait dessus. Pour les CdTe, la faible production photovoltaïque d'aujourd'hui représente déjà 40% de la demande en tellure. Ces deux métaux peuvent donc largement contraindre l'expansion des filières associées. Le Cadmium est plus abondant mais toxique. Ces panneaux, en général, sont plus complexes à produire et recycler. En fait les critiques que l'on entend sur la recyclabilité ou le danger des composants des panneaux photovoltaïques sont dirigées vers ces technologies minoritaires. Je peux me planter, mais de ce que j'ai lu, le photovoltaïque à base de silicium continuera de peser plus lourd que les technologies alternatives.

Bon les panneaux photovoltaïques ont un bon taux de retour énergétique et ça c'est super cool parce que du coup ils peuvent nous aider à lutter contre le changement climatique.

Dans la majorité des cas oui. Mais, le gain potentiel dépend beaucoup de la façon dont ces panneaux sont produits et des moyens de production électrique dans le pays concerné.

En fait, ça va être la même logique que pour le taux de retour énergétique. Le photovoltaïque n'émet pas de CO₂ à l'usage mais les produire en émet.

Oui, et quand on prend ça en compte, si on en croit l'excellent site [electricitymap](#), le photovoltaïque génère environ 45 g de CO₂ par kWh, l'éolien 11g, le nucléaire 12g et l'hydroélectricité 24g. Par contre, les ressources fossiles sont à 820 g de CO₂ par kWh pour le charbon, 650 g pour le fioul et 490 g pour le gaz.

Le photovoltaïque est donc bien mieux que les énergies fossiles.

Et heureusement ! Mais, si on regarde la France, l'électricité est en moyenne selon RTE à 74 g de CO₂ par kWh. Pour diminuer ça, il faudrait réduire la part des moyens de production les plus carbonés donc le peu d'énergie fossile qui reste dans le mix. Or, on a déjà vu dans la vidéo sur l'éolien que les ressources intermittentes ont plutôt tendance à augmenter la dépendance aux ressources fossiles pour ajuster la production électrique. Le photovoltaïque en France n'aide probablement pas à décarboner la production électrique.

Tu es bien sûr de ce que tu dis là ?

On trouve rapidement différents chiffres quand on se penche sur cette question et c'est difficile d'être catégorique. En tout cas, en France et à dépenses équivalentes, je pense sincèrement qu'il y aurait des actions plus utiles comme travailler sur l'isolation ou sur les moyens de transports plus économes en carbone comme le train.

Ce que tu es en train de raconter là c'est horrible pour le photovoltaïque ! Lutter contre le changement climatique c'est quand même pour ça qu'on en fait .

Non parce que les émissions en CO2 de l'électricité française font parties des plus basses du monde. C'est un cas exceptionnel et j'insiste là dessus, la France est un cas particulier. Les panneaux photovoltaïques, même fabriqués en Chine, s'en sortent bien mieux que les ressources fossiles qui constituent une très grande partie des moyens de production électrique dans le monde. Le photovoltaïque pourrait donc faire baisser les émissions de nombreux pays. En fait, il faut retenir deux choses. D'abord que les panneaux photovoltaïques auront un effet d'autant plus notables sur le climat qu'ils seront fabriqués avec des énergies décarbonées. L'idéal pour le photovoltaïque serait qu'il soit produit par du photovoltaïque, de l'éolien, de l'hydroélectrique ou du nucléaire. Or pour l'instant, ils sont beaucoup fabriqués en Chine qui utilise encore énormément de charbon. La propreté de l'électricité issue du photovoltaïque dépend de la propreté de l'énergie qui a servi à produire le panneau. Ensuite que le gain pour le climat ne dépende pas que du bilan écologique du panneau mais aussi de la situation dans laquelle on les installe. Encore une fois, il n'y a pas d'électricité parfaitement propre ou verte, il y a par contre des sources d'électricité plus propres que d'autres.

Donc en gros plus on utilise des moyens de production décarbonés pour produire les panneaux photovoltaïques, plus l'électricité que ces panneaux fournissent est elle même décarbonée.

Oui j'aimerais ajouter un truc. Il y a trois tendances lourdes avec le photovoltaïque. Plus on produit de panneaux photovoltaïques, plus le prix des panneaux baisse, plus l'énergie nécessaire pour produire les panneaux baisse et donc plus les émissions de CO2 pour produire ces panneaux baissent. L'empreinte écologique des panneaux photovoltaïques va probablement continuer de s'améliorer avec son développement.

Alors on a qu'à en mettre partout ! Dis moi, on en installe beaucoup des panneaux photovoltaïques?

Les coûts ont incroyablement chutés au fil du temps et la technologie est viable. Ces dernières années, la puissance installée a augmenté de façon exponentielle. Mais, ça ne fournit qu'un petit pourcent de l'électricité consommée dans le monde. Et l'électricité constitue moins du cinquième de l'énergie utilisée dans le monde.

Ah ouais... il y a du chemin à faire. C'est fou qu'on parle autant alors que c'est une part aussi faible de la production. Pourquoi ça va pas plus vite ?

Pour différentes raisons. D'abord physiques, les contraintes du réseau et du stockage freinent le déploiement des énergies intermittentes, une fois qu'il y en a un peu trop pour un réseau donné. Ensuite, il y a des questions économiques et politiques qu'il faudrait développer. Le déploiement passé du photovoltaïque a été aidé par le financement public et son déploiement futur dépendra de choix économiques et politiques. Il faut aussi voir que par rapport à d'autres moyens de production, le photovoltaïque est une énergie relativement diffuse. Il faut des surfaces importantes pour produire de l'électricité et donc de grandes

quantités de matières. Déployer à grande échelle, des panneaux photovoltaïques est un immense problème logistique et industriel. En France, qui n'est pas le pays le plus vindicatif sur le photovoltaïque, 190 000 tonnes de panneaux ont été installés en 2016 et 2017. Je ne dis pas que c'est impossible mais les quantités de matière en jeu par kWh sont plus importantes que pour d'autres filières. Ce qui souligne évidemment l'importance de la gestion de la fin de vie et du recyclage.

Du coup, c'est quoi le verdict ? Est-ce que le photovoltaïque est la technologie de l'avenir ?

On parle depuis toujours du photovoltaïque comme la technologie de l'avenir et il est difficile de savoir quand est-ce que ça s'arrêtera d'être la technologie de l'avenir pour devenir une technologie avec un rôle significatif. Pour avoir une idée de la part que ça pourrait représenter dans le futur l'agence internationale de l'énergie estimait, en 2014, que le photovoltaïque constituerait 16% de la production d'électricité mondiale en 2050. Autre point de repère, le scénario 100% renouvelable proposé par l'Ademe reposait au final peu sur le photovoltaïque qui ne fournit que 17% de l'électricité. Électricité qui, encore une fois, constitue qu'une part relativement faible de l'énergie totale consommée dans le monde. Il ne faut pas imaginer qu'on connaîtra un monde qui repose sur le photovoltaïque demain matin.

En plus toutes ces technologies continuent d'évoluer pas mal non?

Sur cette belle figure on peut voir que les rendements des différentes technologies ont évolué au fil du temps. Déjà, si on regarde l'abscisse, on peut voir que les premières cellules photovoltaïques certifiées par le NREL sont vieilles de plus de quarantes ans. En fait, ce qui a lancé la recherche civile dans le photovoltaïque c'est le choc pétrolier de 1973 il vient multiplier le prix du baril par 4 en moins d'un an ce qui sert d'électrochoc. Même si il y avait de la recherche sur ce sujet depuis les années 50 dans l'optique de la conquête spatiale. Plus récemment c'est évidemment le changement climatique et la fin des ressources fossiles qui lancent beaucoup d'investissements sur ce secteur.

Et ça a marché, on voit bien que les rendements augmentent au fil du temps.

Oui, mais ça évolue relativement lentement. Il faut se rendre compte que c'est comme ça que la recherche fonctionne la plupart du temps. On doit fournir beaucoup d'efforts pour avoir de petits gains. ça demande des moyens mais aussi du temps.. Il ne faudrait pas penser que les découvertes scientifiques sont des miracles qui arrivent sans investissements. Dernier point important sur la figure que l'on regarde... Ce sont des résultats de laboratoire dans un environnement parfaitement contrôlé. Et on a vu précédemment qu'il y a une différence importante entre le laboratoire et la technologie déployée à grande échelle. On retrouve aussi les quelques technologies dont on a parlé.

On voit surtout qu'il y en a beaucoup d'autres !!!

Certaines de ces technologies n'arriveront jamais sur le marché pour des raisons très diverses. Le marché continue d'être dominé par le silicium et si vous installez des panneaux photovoltaïques sur votre toit, ce sera très probablement du silicium monocristallin ou du

polycristallin. Pratiquement toutes les technologies présentes sur cette figure ont leur défenseur et on ne va pas tout développer.

Et tu ne peux pas nous glisser un mot sur une technologie prometteuse ?

Pour dépasser la limite théorique d'une couche simple, les scientifiques travaillent de plus en plus avec des cellules multi-jonctions. L'idée est de superposer différentes cellules photovoltaïques. Chacune d'elle va absorber une partie du rayonnement solaire à des longueurs d'onde données et laisser passer le reste du rayonnement pour la cellule suivante qui absorbe différentes longueurs d'onde. On repousse donc le rendement théorique maximum. On peut par exemple faire des cellules tandem en combinant une couche mince de silicium amorphe sur du silicium cristallin. Une piste prometteuse est également le tandem de perovskite et de silicium.

Les perovskites ?

Les cellules solaires à perovskite ont fait beaucoup parler d'elles en raison de l'augmentation très rapide de leur rendement. Perovskite est le nom de la structure cristalline formée par un matériau hybride constitué d'halogènes et de métaux. Cette technologie avait un rendement de moins de 4% en 2009 [Miyasaka et al 2009, JACS] et elle est aujourd'hui comparable au silicium (23%). Un des grands défis de cette technologie est l'augmentation de leur stabilité : les cellules à perovskite se dégradent très rapidement en présence d'eau, d'oxygène et même de lumière. Ce qui est gênant. On peut faire des cellules photovoltaïques à base de perovskite seul mais utiliser les utiliser en tandem avec du silicium est plus prometteur et permettrait de faire du photovoltaïque avec d'excellents rendements, possiblement 35%.

Cool

Un autre truc que j'ai trouvé intéressant c'est le photovoltaïque à concentration. En gros l'idée, c'est de mettre une lentille pour concentrer le soleil sur une petite cellule photovoltaïque. L'énorme avantage c'est que du coup, on peut avoir de toutes petites cellules très efficaces. Cette technologie, qui commence à être déployée industriellement, a des implications sur les coûts, le recyclage et permet d'utiliser moins d'espace à production électrique égale. Par contre, ça ne fonctionne que quand le soleil est visible et non en rayonnement diffus. Un nuage et c'est foutu. Du coup, c'est clairement fléché vers les pays sans trop de couverture nuageuse.

Les panneaux photovoltaïques nous permettent de convertir l'énergie radiative de notre cher Soleil en électricité. Le taux de retour énergétique des panneaux photovoltaïques est tout à fait correct et ça implique que l'énergie utilisée pour les produire et les installer est amortie en quelques années d'utilisation. Par contre un taux de retour énergétique autour de 8-10 peut vite se faire grignoter dans des régions avec une moins bon ensoleillement ou si l'installation de photovoltaïque implique d'importants moyens de stockage et le renforcement du réseau de distribution.

Les panneaux photovoltaïques à base de silicium sont composés pour la majorité de matériaux recyclable même si il est encore dur de se prononcer sur le recyclage puisque la majorité des panneaux photovoltaïques n'ont pas atteint leur fin de vie. Il faut espérer que les filières se mettront en place pour traiter l'énorme quantité de déchets que le photovoltaïque peut vite représenter.

Pour déployer une technologie à grande échelle, l'acceptabilité du public est une variable importante et le photovoltaïque a une bonne image, bien meilleure que celle du nucléaire ou même de l'éolien. C'est aussi un de ces avantages.

Les coûts continuent de chuter et la puissance installée connaît une croissance exponentielle. Il est difficile de savoir combien de temps cette tendance se poursuivra mais les panneaux photovoltaïques pourraient fournir un cinquième de l'électricité mondiale en 2050. La principale limite est l'intermittence et donc la nécessité d'avoir des moyens de stockage et une grille électrique capable de gérer tout ça. Et cet aspect sera développé dans d'autres vidéos.

Merci à tous d'avoir regardé cette vidéo. J'espère vous avoir appris plein de trucs intéressants sur cette question primordiale qu'est l'énergie. Le photovoltaïque a été un sujet assez difficile, notamment parce qu'on lit un peu n'importe quoi dessus. Par exemple, un des premiers trucs que j'ai trouvé c'était un papier scientifique qui montrait un taux de retour énergétique de moins de 1... et c'était juste un très mauvais papier scientifique. Il m'a fallu un peu de temps, pas mal d'exergie et surtout l'aide de quelques personnes pour produire un texte dont je suis satisfait. Un grand merci à tous ceux qui m'ont aidé. Comme je l'ai dit au début, je me suis lancé sur tipeg et en fait j'aimerais beaucoup faire de mon activité de vulgarisation mon activité principale par ce que je pense que de parler de ces problèmes environnementaux c'est hyper important, donc si vous trouvez cela cool si vous aimez mes vidéos si vous voulez que ça continue et si vous pouvez vous le permettre et bien vous pouvez maintenant me soutenir financièrement. Dans la prochaine vidéo sur l'énergie on parlera des autres moyens de récupérer directement l'énergie solaire. C'était le réveilleur et à bientôt sur le net.