



**AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES DIVERSES
ÉNERGIES DECARBONÉES DANS LA LUTTE CONTRE LE
CHANGEMENT CLIMATIQUE**

Présenté par Bernard BORDERIE

Concours Étudiant
SAUVONS LE CLIMAT

30 juin 2015

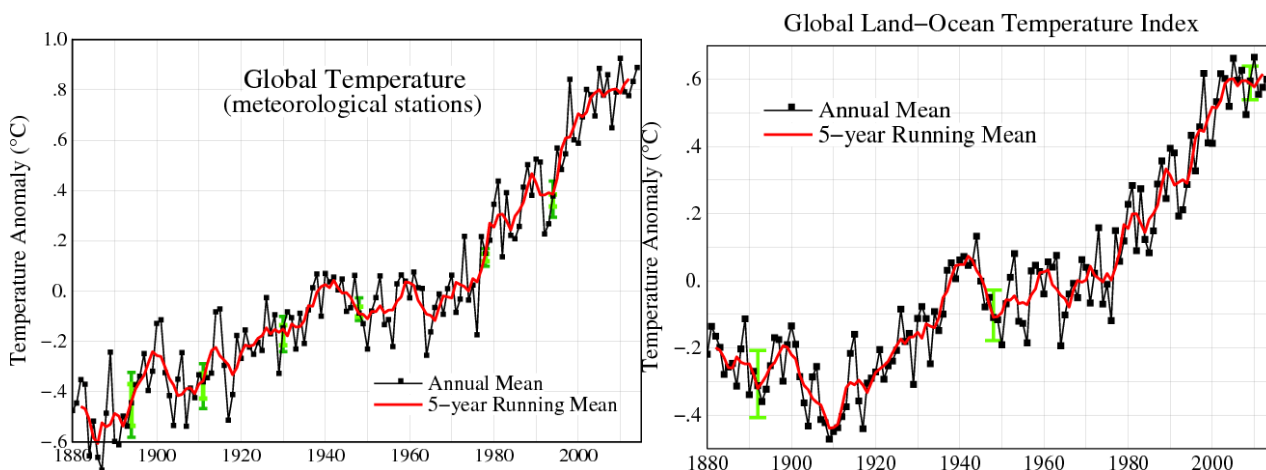


INTRODUCTION

Le changement climatique n'est toujours pas, loin s'en faut, une grande cause nationale ni même mondiale et ce, tant par le constat proprement dit, que par la nature et l'urgence des mesures à prendre pour tenter d'y remédier.

Certains nient purement et simplement tout réchauffement autre qu'épisodique, d'autres contestent que l'activité humaine en soit à l'origine, tandis que d'autres encore – ONG, partis politiques, associations – s'appuient sur le constat du changement climatique pour « vendre » des solutions sans un réel souci de protection du climat. Il existe toutefois un relatif consensus sur certains points :

- les mesures des températures moyennes sur Terre montrent une évolution de l'ordre de +1,2 °C sur l'ère industrielleⁱ



- la surface des grands glaciers et des calottes glacières polaires diminue globalement, malgré une augmentation relative de la surface des glaces en Antarctiqueⁱⁱ
- l'acidification des océans est en augmentation, avec des conséquences directes sur la faune et la flore, mais surtout une capacité d'absorption du CO₂ en baisseⁱⁱⁱ
- depuis le début de l'ère industrielle, la concentration en CO₂ dans l'atmosphère est passée de +/- 300 ppm à +/- 400 ppm (+ 33%)^{iv}
- les rejets de CO₂ dans l'atmosphère de l'activité humaine dépassent les 30 milliards de tonnes par an et atteignent un total de plus de 1000 milliards de tonnes^v

L'explication au réchauffement retenue par une vaste majorité des scientifiques est l'augmentation de la teneur de l'atmosphère terrestre en gaz à effet de serre (GES) qui, par des mécanismes très complexes piègeraient une part croissante de l'énergie reçue du soleil et limiteraient l'émission vers l'espace de la chaleur issue du noyau terrestre.

De nombreux gaz contribuent à ce phénomène : le CO₂, mais aussi le méthane, les divers chlorofluorocarbone (CFC), l'hexafluorure de soufre, avec des capacités de nuisance très diverses liées tant à leur nature qu'à leur durée de vie dans l'atmosphère. Cependant, le principal contributeur à l'effet de serre est le CO₂, en raison des quantités colossales rejetées en permanence par l'activité humaine.

La gravité de la situation vient des conséquences du réchauffement, qui produit déjà des changements majeurs dans le fragile équilibre de ses écosystèmes, et dont les conséquences à long terme affecteront les conditions de vie de l'espèce humaine. À ce sujet, les scénarios sont complexes et nécessairement inexacts compte tenu de la multitude de facteurs en jeu et de

l'infinité d'interactions entre les systèmes. Mais il apparaît comme une évidence, au vu des quantités en jeu, de l'amplitude relative des évolutions et leur brutalité, que les émissions de GES ne peuvent rester sans conséquences durables sur les grands équilibres naturels.

Parmi les solutions envisagées, 3 approches se distinguent : l'amélioration de l'efficacité énergétique, permettant un même service avec une dépense d'énergie moindre ; le captage et stockage du CO₂ ; le remplacement des énergies fossiles par les énergies décarbonées, permettant une production d'électricité ou de chaleur avec des émissions de GES limitées. C'est ce dernier point qui constitue le sujet du présent travail.

Il faut remarquer que les comparaisons utilisées habituellement dans la promotions des énergies dites vertes ou renouvelables omettent souvent l' « énergie grise », c'est-à-dire l'énergie, les émissions polluantes et de GES concomitantes, liées au cycle de vie du produit : fabrication, transport, fonctionnement, entretien, démantèlement et recyclage. Or, cette notion peut affecter sensiblement le bilan carbone d'une production d'électricité ou de chaleur sur la durée de vie du matériel.

Partant du constat indiscutable que les émissions de GES, en particulier de CO₂, sont à l'origine du réchauffement climatique, il va de soi que les meilleures énergies décarbonées, c'est-à-dire celles permettant de le combattre le plus efficacement, sont celles fournissant la meilleure « puissance spécifique », électrique ou thermique, par unité de CO₂ émise. Toutefois, d'autres facteurs doivent être pris en compte dans la sélection des sources d'énergie décarbonées, en particulier la capacité de production, la stabilité, le coût, la facilité de mise en œuvre, les autres impacts environnementaux (bruits, écosystèmes, impact visuel...).

Il ne s'agira pas ici de résoudre la crise du climat en quelques pages, mais plutôt d'étudier dans une approche synthétique et globale, la faisabilité du remplacement des énergies fossiles afin de diminuer au maximum nos émissions de CO₂. Dès lors, nous nous attacherons à étudier les principaux avantages et inconvénients des sources d'énergie décarbonées exploitables à l'heure actuelle, et leur rôle dans la lutte contre le réchauffement.

Après avoir étudié les énergies thermiques (I) et les sources d'électricité (II), nous nous intéresserons aux technologies connexes qui sont des supports indispensables à la mise en œuvre de ces sources d'énergie (III).

I. LES ENERGIES THERMIQUES

A. La filière bois et la biomasse

La combustion de biomasse et de produits qui en sont issus, comme les biocarburants, étant *a priori* fortement émettrice de CO₂, il est nécessaire de rappeler la différence essentielle avec les combustibles fossiles : dans le cas de la biomasse, le CO₂ produit était séquestré (par ex. sous forme de bois) depuis quelques années ou décennies, et la source se renouvelle à la même échelle de temps en capturant à nouveau du CO₂ par photosynthèse. Dans le cas du charbon et autres fossiles, le CO₂ était piégé sous forme de carbone depuis des millions d'années, et sa libération à grande échelle dans l'atmosphère sur une durée relativement courte, sans espoir de le voir piégé à court terme par des processus naturels, n'est donc pas compensée.

C'est en fonction de cette différence essentielle que nous assimilerons à des énergies décarbonées les concepts évoqués ci-après de filière bois, de filière biocarburants, de méthanisation ou d'incinération des ordures ménagères.

Il s'agit d'une part de gérer intelligemment la ressource, en plantant au moins autant que ce que l'on prélève (une déforestation continue s'apparenterait à l'extraction des ressources fossiles) et d'autre part, de consommer efficacement le produit, en mettant à disposition des utilisateurs des matériels à haut rendement et présentant des automatismes les rendant équivalents aux systèmes gaz, fuel ou électriques sur le plan de la facilité d'utilisation.

Les 2 innovations qui permettent d'assimiler le nouveau chauffage au bois parmi les énergies décarbonées sont le niveau de rendement des matériels, et le remplacement du bois brut (la bûche) par un vecteur issu d'une transformation industrielle du bois : les granulés ou pellets. Ces produits sont stockés et transportés facilement et proprement, et permettent par leur conformation une alimentation continue et régulée des appareils de chauffage modernes. S'agissant de produits industriels, dont la distribution est assurée par des commerçants, ils permettent aussi, avantage non négligeable pour l'État, de prélever de la TVA, voire une taxe équivalente à la TIPP.

B. La méthanisation

La dégradation des matières organiques génère entre autres, du méthane, dont la captation est intéressante à deux titres : d'une part le méthane a un potentiel d'effet de serre 25 fois plus élevé (à 100 ans)^{vi} que celui du CO₂ et il est primordial d'en limiter le rejet dans l'atmosphère ; d'autre part, c'est un excellent combustible, propre et maîtrisable, qui produit certes du CO₂ mais aussi seulement de la vapeur d'eau.

L'idée est donc de tirer de la dégradation de différentes sources organiques le méthane produit pour le brûler et utiliser la chaleur soit directement pour du chauffage urbain, soit pour produire de l'électricité, soit les 2 en cogénération. Le méthane peut aussi être utilisé pour la propulsion de véhicules, moyennant une transformation.

Un des avantages de cette filière est la diversité des sources organiques : ordures ménagères, déchets agricoles, notamment d'élevage, avec un fonctionnement opérationnel pour les premiers, en petites unités locales et des essais divers pour les seconds. Ces sources sont gratuites et disponibles de manière décentralisée sur tout le territoire.

Le principal problème reste celui du stockage des résidus après méthanisation, et il n'existe guère d'autre solution que l'enfouissement avec les risques inhérents aux ruptures de confinement et à la dispersion dans l'environnement de bactéries, métaux lourds, pesticides et antibiotiques.

C. L'incinération des ordures ménagères

Comme pour la méthanisation, la matière première est le résultat du tri des collectes sélectives des déchets ménagers, avec l'avantage que les matières recyclables hors verre et métaux qui auraient échappé au tri produiront de la chaleur alors qu'elles n'auraient pas produit de méthane dans l'autre processus et auraient augmenté le volume des résidus ultimes à mettre en décharge.

La chaleur produite par les unités d'incinération peut, comme après méthanisation être utilisée directement pour du chauffage urbain, pour produire de l'électricité, ou en cogénération.

Certaines unités peuvent fonctionner en cogénération et de plus brûler le méthane issu d'anciennes décharges à ciel ouvert, aujourd'hui non exploitées, mais équipées pour la collecte du méthane qui continue à se dégager des millions de tonnes accumulées.

La question de la nocivité des fumées a longtemps fait l'objet de débats, celles-ci étant accusées de disperser à grande distance des substances nocives comme les dioxines et les furanes. Ce problème est maîtrisé dans les unités actuelles et les rejets peuvent se limiter au centième de ce

que prévoit la norme européenne.^{vii} Les résidus solides de la combustion peuvent servir de remblais et les résidus de filtration des fumées (REFIOM) sont facilement stockables en raison de leur faible volume.

Enfin, s'agissant de grosses unités, elles pourraient ultérieurement faire l'objet de captage et stockage du CO₂ (CSC) lorsque le processus sera opérationnel à l'échelle industrielle.

D. Le solaire thermique

Malgré ses avantages, il ne semble pas enthousiasmer nos dirigeants. Il peut pourtant se décliner en installations locales, telles que des chauffe-eau solaires ou des installations de chauffage central, ou en centrales solaires dans lesquelles la chaleur collectée est utilisée pour la production d'électricité.

Le chauffe-eau solaire est un système simple et peu coûteux, consistant en un ballon calorifugé et de quelques m² de panneaux solaires placés en toiture. Le fluide caloporteur est de l'eau glycolée et 5 à 8 m² de capteurs suffisent à une famille de 3 à 7 personnes. Le chauffage solaire existe sur le même principe du fluide caloporteur, il suffit de disposer une surface de capteurs plus importante, de l'ordre de 20 à 30 m² pour un pavillon.

Les émissions de CO₂ à l'utilisation sont nulles, et les émissions liées à l'énergie grise sont faibles compte tenu de la simplicité des installations et des matériaux utilisés.

Dans les régions suffisamment ensoleillées, le solaire thermique peut subvenir à la plupart des besoins en chauffage et eau chaude sanitaire (ECS), remplaçant ainsi les énergies fossiles.

E. Les centrales solaires thermodynamiques

Ces centrales consistent en miroirs paraboliques réfléchissant la lumière solaire vers un tube renfermant un fluide caloporteur, ou dans d'autres systèmes, vers une tour située au foyer d'un champ de miroirs disposés en parabole. La puissance de ces ensembles atteint des dizaines de MW et la chaleur captée est utilisée pour produire de l'électricité.

Il est nécessaire de se positionner dans des lieux bénéficiant d'un ensoleillement important, régulier et relativement protégés des vents extrêmes. Une fois installé, la maintenance du système se limite au nettoyage des miroirs pour conserver le niveau de performance.

Il faut évoquer ici le projet Desertec^{viii}, consistant à installer des centrales solaires dans les déserts d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient. Le cœur du projet serait constitué de centrales solaires à concentrateurs, avec un lissage de la production au moyen de centrales thermiques au gaz naturel, présent notamment dans le Sud-Est algérien. L'export vers l'Europe de l'électricité non consommée sur place s'effectuerait au moyen d'une boucle méditerranéenne Medring utilisant la technologie HVDC du courant continu à haute tension

Ce projet, dont les ambitions ont été revues à la baisse depuis 2013 (seulement 160 MW de solaire thermodynamique en construction au Maroc), résume tous les avantages et inconvénients de la filière solaire thermique à grande échelle :

Dans les lieux d'implantation sélectionnés, l'ensoleillement est important, régulier et les terrains peu chers. La technologie vapeur/alternateurs est classique et moins coûteuse que celles du photovoltaïque. Enfin, la technologie HVDC commence à être bien maîtrisée à grande échelle (jusqu'à 1100 kV pour une puissance de l'ordre de 10 GW)^{ix}. Globalement, on estime que l'exploitation de 0,3 % des 40 millions de km² de déserts par des centrales solaires thermiques permettrait de couvrir les besoins électriques de la planète en 2009 (environ 18 000 TWh/an)^x.

Cependant, outre les considérations géopolitiques sur la stabilité des pays en cause, le risque d'une augmentation de la dépendance énergétique de l'Europe est clair. La vulnérabilité de telles installations à des attaques terroristes est importante. Les régions choisies sont caractérisées par des tempêtes de sable et de gros écarts de température. De plus, le fonctionnement de centrales thermiques demande d'importantes quantités d'eau de refroidissement nécessitant le dessalement d'eau de mer. Enfin plusieurs questions tenant au gigantisme du projet demeurent sans réponse : impact sur l'albédo du désert, forçage radiatif, modifications de la météorologie locale.

Pour certains, le caractère hybride des centrales thermodynamiques permettrait de dénaturer le projet, le gaz n'étant pas utilisé seulement pour le lissage de la production solaire, mais comme source d'énergie principale : 97 % dans le cas d'Hassi R'Mel en Algérie ou 95 % à Aïn Beni Matar au Maroc^{xi}.

II. LES SOURCES D'ÉLECTRICITÉ

Ces sources utilisent des formes d'énergie mécanique naturelles (mouvements de l'eau et de l'air), non pour disposer directement d'énergie mécanique mais pour produire de l'électricité. De la même manière, le solaire photovoltaïque utilise l'énergie solaire pour produire directement de l'électricité.

A. L'hydraulique

L'utilisation de l'énergie de l'eau se décline avec les centrales hydrauliques « au fil de l'eau », de « haute chute », marémotrices, ou hydrolienne selon de nombreux projets à des stades de développement divers mais dont aucun n'est mature.

Les avantages de toutes les sources d'énergie hydraulique sont identiques : dimension et stabilité de la production, faible coût d'exploitation, durabilité des équipements de l'ordre du siècle. C'est un moyen de stocker de l'électricité (STEP), et même le seul permettant de le faire dans ces ordres de puissances (10^8 W).

Mais l'énergie grise est très importante (terrassements et ouvrages béton armé), ainsi que l'emprise au sol des ouvrages et des lacs de retenue. Il faut par ailleurs que la topographie s'y prête : en France les puissances possibles sont limitées à quelques centaines de MW et les sites utilisables le sont presque tous déjà. En Chine, des équipements atteignent 4 200 MW sur des cours d'eau importants. Toutefois dans nos régions, l'équipement de petits sites avec des microcentrales de l'ordre de 100 kW peut apporter un complément de production électrique avec des constructions plus légères.

B. Le vent

Ce qui est nouveau dans l'utilisation de l'énergie éolienne est, comme pour l'hydraulique, sa conversion en électricité, ainsi que l'échelle de puissance des équipements. Les éoliennes sont passées en quelques années de quelques dizaines de kW à 5 voire 8 MW^{xii}.

L'énergie éolienne est gratuite, sa production n'émet aucun gaz à effet de serre, et le génie civil de mise en œuvre est relativement simple, de même que leur opération, intégralement automatique.

Toutefois, bien que les sites d'installation des parcs éoliens soient choisis pour la régularité des vents, dans les meilleures conditions, les parcs terrestres ne présentent que des facteurs de

charge de l'ordre de 20%^{xiii} : outre les conditions anticycloniques qui se traduisent par une absence de vent, les éoliennes atteignent leur puissance maximale vers 15 m/s et doivent être arrêtées en cas de vent trop fort (25 m/s).

L'intermittence de la production est donc leur principal grief, dans la mesure où le stockage d'électricité n'est pas maîtrisé aux niveaux de puissance en cause.

Les défenseurs de cette énergie, comme ceux du photovoltaïque, arguent qu'une dispersion de parcs éoliens terrestres ou offshore sur toute l'Europe, doublée de parcs PV permettrait, en raison du foisonnement des productions, un lissage de la puissance totale. Cela est possible, à condition d'échanger ces productions via un *smart grid*, un réseau européen de lignes à haute tension, qui reste à construire.

Enfin, l'on trouve au titre des inconvénients, les nuisances visuelles (machines de + de 100 m de haut), sonores (infrasons) et vibrations, le danger pour les oiseaux, et la durée de vie des matériels limitée à une vingtaine d'années.

C. Le solaire photovoltaïque (PV)

Le système utilise la propriété de certains semi-conducteurs de produire de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. En assemblant des cellules de ces semi-conducteurs sous forme de panneaux, on constitue des éléments facilement installables en toiture pour produire de l'électricité. Le courant issu des panneaux étant continu, un onduleur est nécessaire pour l'utiliser en autoconsommation ou pour l'injecter sur le réseau. Des « fermes solaires » se développent sur le même principe.

C'est là encore une énergie gratuite, favorisée en France par des conditions de rachat très avantageuses. Elle permet aussi de rendre autonomes des habitations non raccordables au réseau, par l'utilisation de batteries.

Outre le problème de l'intermittence, la fabrication des panneaux est complexe, coûteuse, polluante, et nécessite de grandes quantités d'énergie pour tirer les monocristaux de silicium.

En ce qui concerne le matériel, il est fragile et nécessite d'être propre, et la durée de vie est de l'ordre de 20 ans pour les panneaux et de 8 ans pour les onduleurs. De plus, la perte d'efficacité dans les meilleures conditions atteint les 20 % sur la durée de vie.

Enfin, la quasi-totalité de ces matériels provient de Chine, avec des conditions de fabrication tout sauf « décarbonées ». Le PV ayant fait l'objet de très nombreuses études du fait des incitations fiscales qui lui sont dédiées, on estime qu'il faut environ 3 ans à un panneau solaire pour restituer l'énergie grise nécessaire à sa fabrication^{xiv}.

D. Le nucléaire

Le nucléaire est d'abord une énergie thermique, mais nous le rangeons dans la catégorie « source d'électricité » car c'est là son unique utilisation civile. Elle est sûrement l'énergie décarbonée la moins consensuelle, pour des raisons aussi diverses que ses premières utilisations militaires et les catastrophes que l'on connaît. Avec ses différentes évolutions, le cas du nucléaire pourrait faire l'objet de l'intégralité de cette étude dans la lutte contre le réchauffement climatique. Nous nous contenterons donc d'évoquer rapidement ses principaux avantages et inconvénients.

Au rang des avantages, le nucléaire est d'abord une véritable énergie décarbonée, bien que son caractère propre soit sujet à discussion. Elle est par ailleurs une des sources d'électricité les moins chères (environ 0,04 € / kWh en France en intégrant le coût prévisionnel du démantèlement). Enfin, du fait de l'énorme capacité de production (jusqu'à 1 450 MW par réacteur), peu

d'installations combinées à un maillage rationnel de lignes THT permettent de fournir tout un pays, de manière stable et avec une durée de vie de 40 à 60 ans.

Toutefois, ces énormes puissances ne peuvent faire l'objet d'ajustements de capacité qu'à hauteur de 10 % et la production est donc trop importante aux heures creuses, sans possibilité de stockage de masse, à part en STEP dont la capacité est limitée. Par ailleurs, l'enrichissement est un processus très énergivore (environ 4% de la production électrique nucléaire annuelle en France^{xv}).

L'énergie grise requise par la production d'électricité nucléaire est colossale, et la haute technicité des installations nécessite un savoir faire très pointu (savoir-faire d'ailleurs maîtrisé en France, mais en déclin sur les réacteurs EPR^{xvi}).

Le principal problème de l'énergie nucléaire reste le stockage des déchets, en particulier ceux à haute activité ou de longue durée de vie. Certains peuvent être recyclés en combustibles, mais les déchets ultimes doivent toujours être stockés, avec les risques de contamination à long terme qui, bien que maîtrisés aujourd'hui, ne le seront peut-être plus dans quelques siècles.

Malgré toutes ses qualités de puissance unitaire, de faible prix de revient et de stabilité de production, le nucléaire n'est pas une énergie utilisable n'importe où dans le monde. La stabilité politique est une condition première pour ne pas aboutir à des scénarii catastrophiques. Le cas du renversement du régime du Shah en Iran est exemplaire, l'équipement du pays en centrales nucléaires dérivant aujourd'hui sur la possession à court terme de l'arme atomique.

III. LES TECHNOLOGIES CONNEXES

On ne peut parler d'énergies décarbonées sans évoquer certaines technologies qui permettent soit de récupérer de la chaleur « gratuite » issue d'autres productions (A), soit de démultiplier le rendement thermique de l'électricité (B), soit de stocker de l'énergie (C).

A. Les réseaux de chaleur

Bien qu'il s'agisse essentiellement d'un problème d'efficacité énergétique, on peut rattacher par leur finalité ces systèmes aux énergies thermiques décarbonées. Il s'agit d'amener sur de grandes distances, au moyen de tuyaux calorifugés véhiculant vapeur ou eau chaude, la chaleur résiduelle de centrales électriques vers des gros consommateurs de chaleur tels des serres, des locaux industriels, ou de l'habitat collectif déjà doté de systèmes de chauffage. Les 2/3 de la chaleur nécessaire à la production d'électricité étant perdue, cette énergie présente un coût marginal en carbone nul, ce qui est son principal avantage.

Toutefois, la construction de ces réseaux de chaleur est coûteuse, et leur déploiement est nécessairement localisé autour des grosses sources de chaleur que sont les centrales électriques. Par ailleurs, il faut prendre en compte les émissions de GES pour la construction des réseaux, ainsi que l'efficacité thermique desdits réseaux pour apprécier le rendement de ces installations.

B. Les pompes à chaleur (PAC)

Il ne s'agit pas d'une source d'énergie proprement dite, comme peuvent l'être le rayonnement solaire, le vent ou la biomasse, mais le déplacement de chaleur au moyen de systèmes mus par l'électricité se résume en un effet multiplicateur de l'énergie électrique mise en œuvre. Dès lors, les PAC permettent de créer de la chaleur en utilisant beaucoup moins d'électricité qu'avec des chauffages à effet Joule. En effet, dans les systèmes usuels, des coefficients de performance

(COP) de 3 à 4 sont courants, en fonction de la température du milieu de prélèvement, et de la différence de température de restitution. Les applications domestiques sont le chauffage central et l'ECS.

Les PAC présentent des avantages exceptionnels pour limiter l'utilisation d'électricité en génération thermique : ce sont des systèmes diffus, donc personnalisables en fonction des besoins ; leur coût raisonnable et les économies de consommation de 60 à 70% en chauffage et eau chaude leur permettent un retour sur investissement très rapide ; c'est un système propre, adaptable aux installations existantes à moindre coût, et dont les émissions de carbone sont nulles en fonction de la source d'électricité utilisée.

C. Le stockage

Hormis les STEP, qui exploitent des sites naturels dont le nombre est limité, et dont la mise en œuvre est lourde et complexe, aucune technologie ne permet actuellement de stocker l'électricité à grande échelle. Cependant, les problèmes évoqués plus haut d'intermittence de la production pour le solaire photovoltaïque et l'éolien pourraient être compensés par des solutions individuelles de stockage d'électricité : le constructeur automobile Tesla Motors contribue à la démocratisation de ces dispositifs en commercialisant une batterie permettant de stocker 7 à 10 kWh, suffisamment pour alimenter une petite maison en électricité^{xvii}. L'énorme avantage de ces dispositifs est de permettre l'autoconsommation de l'électricité produite par l'éolien ou le PV, sans nécessiter de lourds aménagements du réseau ni de raccordement.

CONCLUSION

La maîtrise des émissions de GES ayant pour origine l'activité humaine est un problème extrêmement complexe, mettant en jeu des facteurs industriels et techniques, mais aussi politiques et sociologiques, tant les situations des pays sont diverses. Pourtant, l'utilisation combinée de tous les potentiels d'énergie propre suffirait à couvrir les besoins de la planète à long terme, sans compromettre les équilibres climatiques. Mais elles sont souvent limitées, localisées, intermittentes, ou éloignées de leur lieu de consommation, et aucune filière n'apparaît comme universelle.

Outre l'amélioration de l'efficacité énergétique et la CSC, la transition énergétique du monde s'appuiera donc sur un mix énergétique le plus largement décarboné, mais surtout personnalisé en fonction

- des ressources locales tant fossiles que renouvelables, du stade de développement du pays et son contexte géopolitique,
- couplé à des systèmes de transport d'électricité efficaces et intelligents (*smart grids* et *super grids*)
- et des solutions de stockage d'électricité décentralisées.

Par sa globalité et son amplitude, le problème du réchauffement climatique n'appelle qu'un engagement global de tous vers un objectif commun et des solutions spécifiques par pays ou région.

Réussir cette transition pour éviter une dérive catastrophique de l'équilibre thermique de la planète est le premier défi auquel l'Humanité doit faire face de manière globale pour assurer sa survie. Reste à agir pour qu'il ne soit pas le dernier.

-
- ⁱ NASA's Goddard Institute for Space Studies (GISS), Kate Marvel and Gavin Schmidt,
<http://www.giss.nasa.gov/>
- ⁱⁱ Climate Change Research Center (CCRC), UNSW Australia, « Copenhagen diagnosis HIGH »
http://www.ccrcc.unsw.edu.au/Copenhagen/Copenhagen_Diagnosis_HIGH.pdf
- ⁱⁱⁱ Global Ocean Data Analysis Project (GLODAP)
<http://cdiac.ornl.gov/oceans/glodap/>
- ^{iv} United States National Oceanic and Atmospheric Administration (US NOAA), « Global Greenhouse Gas Reference Network »
<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- ^v United States Environmental Protection Agency (US EPA)
<http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/global.html>
- ^{vi} Wikipédia, article « Potentiel de Réchauffement Global (PRG) »
https://fr.wikipedia.org/wiki/Potentiel_de_réchauffement_global
- ^{vii} Centre National d'Information Indépendante sur les Déchets (CNIID), « Les risques environnementaux et sanitaires liés à l'incinération »
<http://cniid.org/Les-risques-environnementaux-et-sanitaires,16>
- ^{viii} DESERTEC Foundation, <http://www.desertec.org> et Wikipédia, article « DESERTEC »
https://fr.wikipedia.org/wiki/Projet_Desertec
- ^{ix} ABB, « ABB develops world's most powerful high-voltage direct current converter transformer »
<http://www.abb.com/cawp/seitp202/238dd27d2a86be67c1257a30002effed.aspx>
- ^x Actu environnement, « DESERTEC ou comment alimenter l'Europe en électricité grâce au soleil saharien »
http://www.actu-environnement.com/ae/news/projet_desertec_8112.php4
- ^{xi} World Bank, « Abener Solar WorldBank »
http://siteresources.worldbank.org/INTMENA/Resources/Abener_Solar_WorldBank.pdf
- ^{xii} AREVA, « Des turbines puissantes conçues pour l'offshore »
<http://www.areva.com/FR/notreoffre-713/turbines-eoliennes-pour-parc-eolien-offshore-solutions-en-energies-renouvelables.html>
- ^{xiii} Wikipédia, article « Facteur de charge (électricité) »
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Facteur_de_charge_\(électricité\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Facteur_de_charge_(électricité))
- ^{xiv} HNC Solar, « Le photovoltaïque : est-ce bon pour la planète ? »
<http://www.hncsolar.fr/photovoltaïque-panneaux-solaires-écologie.html>
- ^{xv} Global Chance, « Petit memento énergétique »
<http://www.global-chance.org/IMG/pdf/GCnHS1p12-13.pdf>
- ^{xvi} Le Monde, « EPR de Flamanville : de plus en plus en retard, de plus en plus coûteux »
http://www.lemonde.fr/planete/article/2015/04/21/epr-de-flamanville-de-plus-en-plus-en-retard-de-plus-en-plus-couteux_4618984_3244.html
- ^{xvii} Tesla Motors, « Tesla Energy »
<http://www.teslamotors.com/presskit>