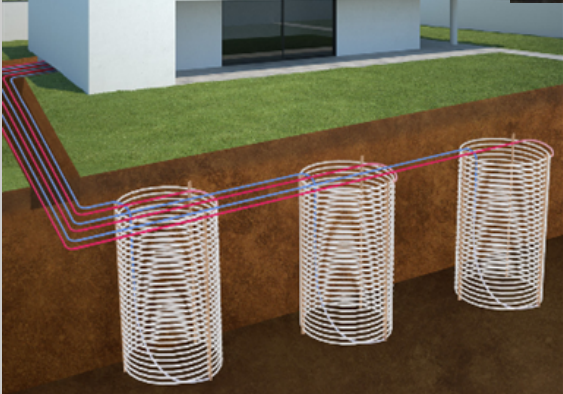


Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur

# Les énergies renouvelables

Par Marcel Caron, Marjolaine Villey-Migraine

Et les membres de la commission Energie du collectif 34/12







# Avant-Propos

Les énergies renouvelables sont un sujet récurrent dans les médias. Elles intéressent en effet un grand nombre de personnes parce qu'elles sont présentées comme des technologies relativement nouvelles, et à ce titre elles constituent un grand espoir pour nos concitoyens, essentiellement à cause de la faible émission de CO<sub>2</sub> pendant leur cycle de vie par rapport à celle des énergies fossiles. En effet, même si la pétition de principe de la nécessité d'une transition énergétique bas carbone n'est pas considérée comme indispensable par un nombre non négligeable de scientifiques, La plupart des français estiment qu'il faut trouver des solutions pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre (GES), dont le principal est le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> (69% des GES), pour éviter le réchauffement trop rapide de notre climat planétaire, déjà bien entamé (Il convient toutefois de ne pas perdre de vue les autres émissions de gaz à effet de serre, en particulier le méthane (CH<sub>4</sub>) responsable à lui seul de 24% des émissions de GES, de même que le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), 5% ).

Ce petit livre est destiné à toute personne qui s'intéresse à **toutes** les énergies renouvelables, même celles qui ne se voient pas et dont on parle moins. C'est un livre pour les curieux qui ne veulent pas être affrontés à trop de détails techniques, pour les débutants dans ce domaine, un livre de base utile pour les élèves aussi.

Donc, un livre pour les lecteurs de 9 à 119 ans, qui non seulement présente les différents thèmes liés aux EnR, mais aussi pose des questions pour le présent et l'avenir. Les auteurs donnent aussi parfois leur avis (qui s'appuie sur des avis d'experts, bien sûr) sur certaines d'entre elles, avis forgé sur les recherches qu'ils ont effectuées.

Le lecteur se départira sans doute difficilement d'une certaine circonspection, car c'est un sujet sur lequel l'unanimité est loin d'être atteinte. Les débats sont tendus à beaucoup de niveaux, y compris celui des états, de l'Union Européenne, des Etats-Unis... L'idéologie a une forte prise dans ce domaine que pourtant peu de personnes appréhendent dans sa globalité. Ainsi les écologistes les plus connus, qu'ils soient militants de partis politiques ou d'associations, véhiculent des idées qui sont parfois peu rationnelles : l'objectif, sauver le climat, doit être atteint très vite, au mépris d'un certain nombre de précautions élémentaires.

Par exemple, il faut atteindre 100% d'EnR, exigent-ils, il faut cesser immédiatement les recherches de nouveaux champs pétroliers, abandonner totalement et très vite le nucléaire...

Ils ne sont pas les seuls à peser sur l'opinion, loin s'en faut. Celle-ci est largement dominée par les milieux les plus divers dont la caractéristique commune est de protéger des intérêts et qui font en sorte que les choses bougent peu ou pas. Ainsi des entreprises qui se donnent une image écologique en sponsorisant des associations, ce qui est une des façons de mettre de la peinture verte sur les dégâts environnementaux qu'elles provoquent. De même de nombreuses publicités et articles qui peuvent paraître sensés sont en réalité de la manipulation mentale et visent à fabriquer du consentement. Ce matraquage idéologique est d'autant plus aisé que le souci de l'environnement est partout, provoquant un sentiment de saturation. Le **greenwashing** brouille les pistes, de telle sorte que la moindre idée écologique donne immédiatement prise dans l'espace public à des discours et des pratiques au caractère fumeux, l'objectif étant de tromper pour préserver le statu quo et continuer à investir pour faire des profits.

Dans ces conditions, faire un nouveau livre sur ce sujet est une entreprise difficile et de longue haleine. Nous tenons à souligner qu'il a été élaboré sans aucun soutien financier, ce qui garantit une absence totale de conflit d'intérêt et l'objectivité nécessaire à ce type de travail, ce qui contraste avec un livre publié récemment qui s'intitule « les énergies renouvelables pour les nuls ».

Celui-ci a été écrit par deux personnes dont la première est en train de faire fortune dans le secteur des énergies renouvelables et la seconde un des responsables de l'ADEME, agence d'Etat, qui, à ce titre devrait faire preuve de neutralité, organisme officiel qui a publié des (scenarii pour l'avenir) qui ont été très fortement critiqués par de nombreux spécialistes pour leur absence de réalisme, de sorte que pour ces raisons, malgré d'évidentes qualités, cet ouvrage n'apporte rien de réaliste sur les grandes questions, car entaché d'idéologie.

Comment nous situons nous ? Nous sommes des pragmatiques qui tentons de trouver des solutions réalistes et raisonnables à partir de données scientifiques. Nous vérifions d'abord le bien-fondé des affirmations sur les questions environnementales et climatiques et par ailleurs, nous sommes guidés par au moins deux principes forts : celui de la sécurité du réseau électrique (ce qui est d'autant plus important, comme on le verra dans le présent livre, qu'on s'oriente vers le « tout électrique »), et celui de la lutte contre le réchauffement climatique.

Nos informations, nous les avons puisées dans de nombreux sites internet, celui d'EDF, bien sûr, celui de Wikipédia, mais aussi : Planète Energie, Futura-sciences, PV Magazine, l'ADEME, Connaissance des Energies, le Monde de l'énergie, le Céréme, le Montchampot, Carbone 4, le Shift Project, et bien d'autres...

Nous avons également lu de nombreux livres, dont « La transition énergétique : la France en échec » (par un groupe de travail), « Eolien et PV en Europe : la trahison des clercs » par Bernard Durand et Jean-Pierre Riou... les chapitres d'encyclopédies consacrés à ce sujet, dont l'encyclopédie Larousse.

et également de nombreux rapports : ceux de l'Agence Internationale de l'Energie, de France Stratégie..., de RTE (réseau de distribution de l'électricité), de l'ADEME...

ainsi que d'innombrables articles dans des quotidiens nationaux et régionaux, mais aussi dans des revues comme les Annales des Mines, la Révolution Energétique, Transitions et Energies, European Scientist, Sciences et pseudo-sciences, pour ne citer que les principales.

Marcel CARON, Marjolaine Villey-Migraine et la commission « Energies Renouvelables » du collectif d'associations situées dans l'Hérault et l'Aveyron (Collectif pour la Protection des Paysages et de la Biodiversité 34-12), membre d'un collectif régional « Toutes nos Energies Occitanie Environnement », remercient tous les lecteurs, relecteurs et commentateurs, et tout particulièrement Gérard, Henri, Michel, Dominique, Emmanuel, Kevin, Jean, Bruno...

# ***Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur les énergies renouvelables***

**pour lecteurs de 9 à 119 ans**

## **Sommaire**

<b>Introduction</b> .....	p. 7
<b>1<sup>ère</sup> partie : D'abord économisons l'énergie</b> .....	p. 12
<b>2<sup>ème</sup> partie : Les énergies renouvelables intermittentes</b> .....	p. 14
<b>Chapitre 1 - L'éolien terrestre, un vecteur d'énergie électrique</b> .....	p. 14
- l'éolien terrestre industriel .....	p. 14
- la question du recyclage .....	p. 19
- l'éolien offshore ou maritime .....	p. 20
- l'hydrolien .....	p. 21
- l'énergie des vagues .....	p. 21
<b>Chapitre 2 - L'énergie solaire</b> .....	p. 22
- le solaire thermique .....	p. 22
- les panneaux photovoltaïques .....	p. 23
- inconvénients .....	p. 24
- les centrales solaires thermodynamiques .....	p. 25
- autres développements du photovoltaïque .....	p. 26
- éléments de conclusion .....	p. 27
<b>Chapitre 3 : Le stockage de l'énergie</b> .....	p. 28
- les batteries, la problématique des minerais .....	p. 30
- l'hydrogène .....	p. 30
- l'hydrogène gris .....	p. 31
- l'hydrogène vert .....	p. 31
- rendement médiocre ? .....	p. 32
- la chaleur renouvelable est stockable .....	p. 33
- les réseaux de chaleur renouvelable .....	p. 34
- la mobilité électrique .....	p. 35
- la mobilité hydrogène .....	p. 37

- conclusion sur la mobilité .....	p. 38
- conclusions sur les énergies renouvelables intermittentes .....	p. 40
<b>3<sup>ème</sup> partie : Les énergies renouvelables pilotables .....</b>	<b>p. 41</b>
<b>Chapitre 1 - L'énergie hydroélectrique .....</b>	<b>p. 41</b>
- les grands barrages.....	p. 41
- l'hydroélectricité « au fil de l'eau » .....	p. 44
- la petite hydroélectricité .....	p. 44
<b>Chapitre 2 - La géothermie .....</b>	<b>p. 46</b>
- la géothermie profonde .....	p. 46
- la géothermie de proximité .....	p. 49
- les pompes à chaleur .....	p. 51
- bilan .....	p. 52
- géothermie individuelle pour particuliers .....	p. 55
<b>Chapitre 3 - La biomasse .....</b>	<b>p. 56</b>
- le bois-énergie .....	p. 56
- limite de la filière .....	p. 57
- autres utilisations de la biomasse .....	p. 58
- la production de carburant .....	p. 60
- conclusion .....	p. 61
<b>Chapitre 4 - La chaleur renouvelable, un vecteur énergétique méconnu .....</b>	<b>p. 61</b>
<b>Conclusions .....</b>	<b>p. 62</b>
- vers le tout électrique ? .....	p. 62
- quelle transition énergétique ? .....	p. 64
- que faire ? .....	p. 69

# Introduction

L'énergie, c'est quoi ?

**De quoi parle-t-on lorsqu'on évoque les énergies renouvelables ?**

Les énergies renouvelables soulèvent un grand nombre de questions. Mais avant tout, pour comprendre ce petit document, il faut rappeler ce qu'est une énergie et pourquoi elle peut être renouvelable.

“En physique, l'énergie quantifie le changement. Dès que quelque chose change de forme, de position, de vitesse, de composition chimique ou atomique, rayonne, etc. il y a un transfert énergétique”.

Il existe plusieurs types d'énergies :

**L'énergie primaire** : c'est une forme d'énergie disponible dans la nature avant toute transformation. Les principales énergies primaires sont : le soleil, le vent, les marées, l'eau en mouvement, les courants marins, la chaleur des sols et des sous-sols, les réactions chimiques des matières organiques vivantes, la méthanisation, la combustion, le charbon, le pétrole, le gaz naturel, la désintégration atomique...

**L'énergie secondaire ou vecteur énergétique** : Une telle énergie est considérée comme un « véhicule » entre l'énergie primaire et l'énergie finale.

(Ex : le pétrole qu'il faut transformer pour faire de l'essence. L'essence est bien un vecteur énergétique qui une fois dans le moteur lui permettra de fonctionner.)

**L'énergie finale** : C'est l'énergie au stade final de la chaîne de transformation, c'est-à-dire au stade de son utilisation par le consommateur final.

Ex : La voiture avance grâce au mouvement mécanique donné par l'explosion de l'essence dans les cylindres du moteur qui le fait tourner.

**On a parlé d'énergie primaire, secondaire et finale, mais pas de renouvelable ?**

On dit qu'une énergie est renouvelable si à notre échelle de temps, en l'utilisant, nous n'en diminuons pas la quantité initiale existante.

Exemple : Le vent, qui est issu de la rotation de la terre et des courants de convection dus au soleil à notre échelle est inépuisable. Lorsqu'il souffle, on peut donc récupérer son énergie par divers équipements indéfiniment. L'électricité produite par la force mécanique du vent sur les pales d'une éolienne est considérée comme une énergie renouvelable.

**Par opposition :**

Le pétrole qui provient de la décomposition d'organismes marins (principalement de plancton) accumulés dans des bassins sédimentaires, au fond des océans, des lacs et des deltas, est limité en quantité. Ce pétrole, à notre échelle, n'est donc pas renouvelable. On l'a nommé énergie fossile du fait de sa provenance.

Avant le début des années 1850 (début de l'ère préindustrielle), l'ensemble des civilisations de notre monde utilisait presque uniquement des équipements fonctionnant grâce aux énergies renouvelables utilisant le vent, le soleil, l'eau en mouvement et le feu. La seule autre énergie connue était l'énergie musculaire des animaux ou des humains ! On ne connaissait rien d'autre.

**Tout change avec le début de l'ère industrielle.**

Puis, lorsque l'on a découvert et commencé à utiliser les **énergies dites fossiles**, essentiellement le charbon dans un premier temps (la machine à vapeur) et le pétrole. Elles ont bouleversé notre façon d'être par leur très grand pouvoir énergétique.

Il a fallu toujours plus d'énergie, et sous toutes les formes. Elles ont permis de faire avancer les tracteurs, les voitures ou les camions mais aussi les trains, de faire voler des avions, de s'éclairer, faire fonctionner les moteurs électriques utilisés dans l'industrie, se chauffer et tellement d'autres choses aujourd'hui considérées comme indispensables... comme de faire fonctionner notre Internet, nos ordinateurs, les centres de données (data center), nos téléphones portables, etc.

Mais, tout n'est pas si simple. Depuis les années 30 (loi Morizet), les problèmes de pollution sont bien connus. On sait que les énergies fossiles sont émettrices de particules et de gaz à effet de serre (GES) dont le fameux CO<sub>2</sub>. Si dans les années 50/60 on se préoccupait uniquement de nettoyer les façades parisiennes noircies par la suie des chauffages au bois et/ou charbon, ou de s'inquiéter de l'émission des fumées noires s'échappant par les grandes cheminées de l'industrie ou même de la pollution des autos qui à l'époque n'étaient pas performantes et qui étaient surtout très consommatrices, on sait aussi depuis les années 70, que les combustibles fossiles ne sont pas inépuisables. La Terre, étant une entité finie, ne pourra pas donner plus de pétrole, de gaz ou de charbon qu'elle n'en contient (rapport Meadow 1972 pour le Club de Rome).

Evidemment, l'évolution de notre société et la croissance économique sont essentiellement dues à l'augmentation de la consommation d'énergie qui, quelles qu'elles soient, génèrent beaucoup d'avantages. Mais alors que l'on est seulement dans les années 60/70, on parle déjà de pollution et de pénurie. Dans ces mêmes années, pour des raisons d'indépendance énergétique, il a été décidé de doter la France à grande échelle de l'énergie électronucléaire. On y pensait depuis quelques années, mais cela s'est accéléré avec le premier choc pétrolier (1973) ainsi qu'en raison d'un montant du dollar très élevé par rapport au franc. Le dollar, à cette époque, est la seule devise pour le négoce que carburant pétrolier et du gaz.

Ce programme électronucléaire nous a permis de fortement limiter l'achat de pétrole et de charbon pour fabriquer notre électricité (plus de 70% de la production totale encore à ce jour), mais il a aussi permis, sans pour autant qu'on le recherche, de limiter très fortement les émissions de CO<sub>2</sub> en France.

### **Le monde associatif, puis le monde politique s'inquiètent des données alarmistes fournies par certains chercheurs sur la pollution.**

Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), organisme qui a été créé pour étudier l'impact de l'activité humaine sur les changements climatiques, nous rappelle fréquemment les liens entre les émissions de CO<sub>2</sub> des énergies fossiles, sa concentration dans l'atmosphère et l'augmentation de la température moyenne mondiale.

La concentration moyenne de CO<sub>2</sub> qui était stable depuis des millénaires est passée de 280 ppm (parties par millions) au début des années 1850 (ère préindustrielle), à 410 ppm actuellement. Il a été décidé que c'était un vrai problème qu'il convenait de régler. Le choix a été fait de limiter fortement l'utilisation des énergies fossiles.

Leur épuisement inéluctable et l'augmentation des GES (gaz à effet de serre), dont le CO<sub>2</sub>, ont amené les gouvernements de très nombreux pays à favoriser des producteurs d'énergies n'émettant pas ce type de pollution. C'est ainsi que de façon opportuniste des énergies renouvelables (EnR) se sont développées.

A ce point de notre développement, il importe d'apporter quelques précisions sur le changement climatique et l'émission de gaz à effet de serre. Beaucoup de militants écologistes tentent de culpabiliser leurs compatriotes sur cette question et réclament entre autres à cor et à cris la fin de la prospection pétrolière et celle de la fabrication de voitures thermiques.

### **Qu'en est-il de l'émission de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère dans le monde et en France ?**

Le GIEC indique que l'ensemble des pays mondiaux ont émis en 2019 **43** milliards de tonnes (Mdt) de CO<sub>2</sub>, (36,8 Mdt pour raisons anthropiques et 6 Mdt pour le changement de nature des sols), que la France en a émis **441** millions de tonnes, soit **1.025%** du total mondial. (N'est pas compris toutefois le CO<sub>2</sub> issu des importations et celui des entreprises délocalisées, ce qui porterait notre véritable empreinte carbone à près de 2%).

Pour l'électricité, RTE (BE 2019) indique que le CO<sub>2</sub> qui lui est dû est de **22** millions de tonnes pour un productible total français de 537,7 TWh. Donc, les émissions de CO<sub>2</sub> de l'**électricité** représentent **4,98%** du total de CO<sub>2</sub> émis par la France. Au niveau mondial, l'impact CO<sub>2</sub> de l'électricité française est donc de 0,05%. Cela tient à ce que la production électrique française est peu émettrice de GES, car elle provient pour l'essentiel de l'énergie nucléaire et de l'hydroélectricité. C'est un sujet sur lequel nous reviendrons.



Mais si on regarde plus près à l'échelle mondiale, on s'aperçoit que l'émission de CO2 et de gaz polluants vient surtout de secteurs que généralement on remet peu en cause. Ainsi, à elles seules, 5% des centrales électriques dans le monde sont responsables de 73% des émissions de CO2 liées à la production d'électricité (selon une étude de chercheurs de l'Université du Colorado, in *Transitions et Energies n°10*). Elles se situent en Asie, Inde, aux USA et en Europe centrale et du Nord.

De même, un autre secteur, celui des transports maritimes (2% des émissions mondiales de GES) :

Selon un article du Financial Times paru dans le « Courrier International » du 4 juillet 2019, le transport maritime est le poumon de l'économie mondiale : 90% des échanges se font par la mer... Plus de **90 000 navires** ont sillonné les océans chaque année, **brûlant 2 milliards de barils de fuel lourd** (issu des déchets les plus sales de la distillation du pétrole brut).

Ces navires recrachent de grandes quantités de polluants, principalement sous forme de dioxyde soufre, d'oxydes d'azote et de particules au détriment de la santé des populations... 2 à 3% de gaz à effets de serre tel que le dioxyde de carbone...

**Les 200 plus gros navires produisent autant de dioxyde de soufre que l'ensemble des véhicules automobiles circulant dans le monde.**

De plus, l'énorme parc de machines (dans l'industrie, les BTP...) qui fonctionnent au fuel n'est pas étranger à cette pollution.

La question est de savoir si on peut se passer de tout cela et comment : actuellement dans le monde, on consomme 10 milliards de tonnes de ressources fossiles. C'est ce qui permet d'atteindre, et de conserver, le niveau de vie que nous connaissons aujourd'hui.

**Les énergies renouvelables sont-elles capables de les remplacer ?**

**Autre question : pourquoi a-t-on choisi des solutions si onéreuses ? D'autres solutions n'étaient-elles pas possibles ?**

Dans ce contexte, les pouvoirs publics ont décidé de recourir aux énergies renouvelables peu émettrices de CO2 et surtout aux éoliennes et au solaire photovoltaïque, dont le handicap est l'intermittence et qui sont très onéreuses. La Cour des Comptes dans son rapport début 2018 nous expliquait que **121 milliards** avaient été engagés pour les énergies renouvelables censées faire baisser le CO2 dans l'atmosphère.

Cela concerne les projets engagés avant le 1<sup>er</sup> janvier 2018. Si on rajoute les nouveaux projets d'EnR depuis 2017 non comptés dans le rapport de la Cour des Comptes, ainsi que les projets offshores, y compris les travaux de mise à niveau des réseaux 400 KV, 220 KV et autres... nécessaires aux EnR, on peut rajouter la même somme = **120 Mds**, soit un total de **240 milliards €** et dans ce cas, on passe à **8000 € / foyer** (240 Mds / 30 millions de foyers). Si la répartition se fait sur 20 ans, cela représentera une augmentation des factures EDF en moyenne de **400 € / an et par foyer**.

En outre, pour parer à l'intermittence, il faut utiliser des source d'énergies pilotables, ce qui entraîne le maintien d'un système, lui aussi coûteux, de production d'énergie parallèle, de centrales fonctionnant au charbon, au gaz, voire au fuel.

Cette solution qui a la faveur des producteurs des énergies électriques intermittentes et de nos dirigeants, a l'inconvénient de multiplier par deux, voire trois, le coût de l'énergie.

Comment comprendre que la France se soit lancée dans des dépenses si importantes alors qu'à priori, elle n'avait pas besoin de le faire ? Elle est l'un des pays les plus décarbonés au monde, de par la prépondérance de l'énergie nucléaire et de l'hydroélectricité.

Notre travail va consister à essayer de comprendre cette attitude paradoxale, à travers la description et l'examen de chacune des énergies renouvelables.

**Les 200 plus gros navires produisent autant de dioxyde de soufre que l'ensemble des véhicules automobiles circulant dans le monde...**

## Dans quel cadre celles-ci se développent-elles ?

**Les décisions gouvernementales ont été prises dans le cadre des recommandations du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) qui ont servi de base aux accords de Paris sur le Climat. Celui-ci a préconisé une transition énergétique bas carbone pour contenir le réchauffement climatique à 1,5°C. En France, la loi pour la transition énergétique et la croissance verte d'août 2015 a abouti à la PPE (Programmation Pluriannuelle de l'Énergie) de 2020 qui vise à décarboner notre production d'énergie : baisser de moitié d'ici à 2050 notre consommation finale d'énergie et diversifier notre mix énergétique. Elle a introduit aussi une « feuille de route » pour atteindre cet objectif, la SNBC (Stratégie Nationale Bas Carbone).**

La France a choisi pendant la dernière décennie, par voie législative, de réduire cependant la part du nucléaire dans le mix énergétique électrique à 50% dans les années 2030 (décision remise en cause au début de 2022, comme on le verra plus loin), et d'augmenter la part des énergies renouvelables d'une manière conséquente. Que peut-on en penser ?

Dans le présent travail d'investigation, il nous faut éviter le piège des jugements émotionnels, omniprésents dans le débat sur l'énergie : alors qu'on devrait s'en tenir au rationnel, il apparaît que la discussion est généralement biaisée par des a priori imposés par les milieux officiels et parfois relayés par les médias.

Ce que nous voulons, c'est enquêter sur ce qui existe en matière d'énergies renouvelables, et, bien sûr, nous assurer de leur fiabilité. Il s'agit d'être le plus concret possible, en ne perdant pas de vue trois objectifs essentiels et actuels de notre société : la lutte contre le réchauffement climatique et la reconquête de la biodiversité, l'artificialisation des sols, sans oublier les autres dimensions du développement durable (Objectifs 2030 de l'ONU).

## Dans ce petit livre, seront abordés les vecteurs d'énergies renouvelables suivants :

- ✓ L'éolien industriel et domestique
- ✓ Le solaire photovoltaïque industriel et en autoconsommation
- ✓ Le solaire thermique collectif et individuel
- ✓ L'hydroélectricité et la micro-hydraulique
- ✓ La géothermie profonde productrice d'électricité
- ✓ La géothermie de proximité, pour le chauffage des logements et pour le collectif-tertiaire, dont les réseaux de chaleur et les boucles d'eau tempérée
- ✓ La récupération d'énergie à partir du bois ou des déchets... (la biomasse),

## et différents sujets qui y sont liés :

- ✓ *Le stockage de l'énergie*
- ✓ *L'efficacité et la sobriété énergétique*
- ✓ *La mobilité : est-elle renouvelable avec l'avènement de la voiture électrique ? et celui des véhicules et engins à hydrogène ?*

## C'est surtout d'électricité qu'il sera question et on verra pourquoi plus loin.

Et dans ce domaine, dans quels termes le problème se pose-t-il ? On nous rebat les oreilles d'« électricité 100 % verte ». C'est ce que nous promettent tel et tel fournisseur d'électricité, alors que le réseau de distribution ne peut fournir qu'une seule électricité qui est un « mix » dans lequel le poids de chaque source est variable.

Mais actuellement, ce sont surtout les énergies fossiles qui tiennent le haut du pavé : en France, 80 %, et surtout pour les transports.

## Question : Pourrait-on les remplacer par des énergies renouvelables ?

Si en plus, il fallait aussi se passer du nucléaire, comment ferait-on ? C'est la quadrature du cercle.

Les énergies renouvelables, quelles sont-elles, et quels en sont les avantages et les inconvénients ? Elles seront abordées une par une, puis on tirera quelques conclusions qui ne pourront qu'être provisoires, puisque des avancées technologiques sont attendues pour certaines d'entre elles.

Pour illustrer notre propos, voici un extrait d'interview de Jean-Marc Jancovici expert en énergie et en prospective climatique :

### « Un scénario « 100 % énergies renouvelables » est-il possible ?

*Bien sûr que si, c'est possible. En l'an de grâce 1500, le monde était 100 % énergies renouvelables. Un monde « tout renouvelable » est du reste le seul que notre espèce ait connu entre son apparition, il y a 20 000 ans, et... le début de la révolution industrielle. Il n'y a donc aucun problème physique pour y retourner. Ce qui n'est pas possible, c'est d'y revenir avec 500 millions d'habitants en Europe, et 35 000 euros de PIB par personne et par an, et des retraites payées jusqu'à 85 ans.*

*La révolution industrielle, c'est avoir adjoint aux hommes, grâce aux énergies fossiles, la force toujours croissante d'un parc de machines toujours croissant, qui travaillent la matière à la place de nos bras et jambes, et qui désormais font tout à notre place...*

*Continuer à alimenter le même parc de machines surpuissant avec juste des énergies renouvelables, c'est cela qui ne sera pas possible. La traduction économique de l'affaire est un PIB par personne beaucoup plus petit... un monde 100 % ENR est un monde où le pouvoir d'achat a beaucoup diminué. Je ne dis pas qu'il ne faut pas le faire, je dis juste que c'est mentir que de le promettre sans contraction forte de la consommation. »*

Extrait d'une interview de Jean-Marc Jancovici dans le Figaro, le 18.03.2020

## Les énergies renouvelables

### Quelles sont les énergies renouvelables ?

### Comment peut-on les classer ?

On distingue **les énergies intermittentes, variables et aléatoires** et **les énergies pilotables, réglables et pérennes** (fonctionnant en permanence ou à la demande).

Nous traiterons donc d'abord les énergies intermittentes.

Et d'abord **l'éolien** et le **solaire** qui ne fonctionnent, pour l'un que lorsqu'il y a du vent, pour l'autre que lorsqu'il y a du soleil.

Pourquoi focaliser sur l'intermittence ? D'abord parce que lorsqu'il y a interruption de production, et qu'on doit se passer d'électricité, il y a un manque difficile à supporter pour la plupart des êtres humains. Cela prend même vite l'allure d'une catastrophe lorsqu'il y a un black-out, surtout lorsqu'il dure plusieurs heures (problème de congélateur, de chauffage, d'appareillage médical).

L'habitude a été prise depuis des décennies de ne jamais manquer de courant électrique. Des coupures seraient vite insupportables pour l'immense majorité de la population.

Et donc, pour compenser le manque dû à l'interruption quand le vent cesse et que le soleil vient à manquer, il faut disposer de **moyens de production de substitution** (qui sont très souvent polluants et générateurs de CO2) et le jonglage entre les énergies intermittentes et les énergies de substitution ne laisse pas de poser des problèmes pour le gestionnaire du réseau français RTE.

Le problème avec les renouvelables intermittentes est aussi que leur production est aussi parfois trop abondante, quand il y a beaucoup de vent et un ensoleillement important. Les réseaux se retrouvent ainsi avec trop d'électricité renouvelable dont ils ne savent que faire, qu'on vend donc à perte, et qu'il est aujourd'hui difficile et coûteux de stocker. On reviendra sur ce sujet plus loin.

De plus, les EnR intermittentes seules sont loin de pouvoir produire les quantités nécessaires d'électricité pour couvrir les énormes besoins actuels (8000 éoliennes, c'est seulement 7% de la production française, voir le bilan de RTE 2021)

Le handicap de l'**intermittence** pourrait-il trouver une solution dans le stockage de l'énergie ? Où en est-on dans ce domaine ?

Puis nous présenterons les autres sources d'énergie renouvelables que nous appellerons **pilotables**, par opposition aux intermittentes.

Ce sera d'abord l'**hydroélectricité**, bien connue.

Puis la **géothermie** sous toutes ses formes et tout ce qui s'y rattache, dont les pompes à chaleur.

Et enfin la **biomasse** avec ses aspects très divers.

## 1<sup>ère</sup> partie

# D'abord, économisons l'énergie

***Ce chapitre est volontairement court. Il est indispensable certes d'évoquer cet aspect du problème, mais notre objectif est surtout la production d'énergie.***

On ne peut aborder la question des énergies renouvelables, souvent budgétivores, sans envisager d'abord d'économiser l'énergie. « **La meilleure des énergies, c'est celle qu'on ne consomme pas** ».

Et la première des solutions, c'est l'isolation thermique des bâtiments. Un immeuble bien isolé consomme cinq fois moins d'énergie. Et évite qu'on ait à en produire.

La mise en œuvre de solutions architecturales, comme par exemple la maison bioclimatique, et l'utilisation de certains types de panneaux solaires translucides renforcent les économies et permettent d'aboutir à des immeubles à énergie positive, indépendants pratiquement à 100 % des réseaux de distribution d'énergie. De même, il existe des quartiers à énergie positive.

Mais il en existe bien d'autres façons d'économiser l'énergie :

**1 - rechercher une sobriété optimale de matière et d'énergie** de façon à aboutir à une économie économe...

- ✓ favoriser le fret ferroviaire, la navigation fluviale...
- ✓ acheter local, éviter le gaspillage de nourriture...
- ✓ multiplier les bourses d'échange, les ressourceries...
- ✓ utiliser de nouveaux procédés technologiques dans les industries énergivores (cimenteries, pétrochimie...)

On peut aussi économiser en rendant les moteurs et les machines plus efficaces (diminution de la consommation de carburant aussi bien dans les véhicules sur terre que dans les avions). C'est ce qu'on appelle l'**efficacité énergétique**.

**2 - des choix techniques dans différents domaines**, comme le traitement de déchets, l'agriculture, l'architecture (cf. plus haut : les éco-quartiers, les immeubles à énergie positive ...), les écogestes..., les ampoules LED, les aspirateurs sans sacs, le low-tech... de solutions permettant de capter la chaleur, dont les murs capteurs et les murs-trombes (un espace sous verre à peu de distance d'un mur permet d'accumuler la chaleur (aspect développé dans notre chapitre sur le solaire)...

**3 - des choix de vie** : il faut réexaminer le gigantisme, celui des villes, des agglomérations de plus en plus tentaculaires..., le tourisme de masse qui implique un trafic aérien démesuré, des navires de taille démente et hyper-polluants, la sursaturation de sites et de zones touristiques. La simplicité et la modestie seraient de mise et permettraient d'éviter d'avoir à gérer de manière coûteuse des problèmes de déchets et de pollution. On a pris la mauvaise habitude de mettre en place des monstres et de vouloir encore les développer davantage.

**4 - envisager la décroissance ?** Il est de plus en plus difficile d'admettre qu'on consomme indéfiniment plus que la planète ne contient de ressources...

5 - On pourrait aussi **faire des choix d'investissements** qui tireraient la consommation d'énergie vers le bas, comme par exemple, l'aménagement de pistes cyclables, une nouvelle structuration des transports en commun... promouvoir le télétravail, le co-voiturage...

6 - Au total, on peut aboutir à des résultats intéressants en recherchant la sobriété et l'efficacité.

La difficulté, cependant, est le trop peu de volonté des populations de renoncer à leur mode de vie (excepté, bien entendu, la fraction la plus pauvre de la population astreinte à une sobriété forcée) ou à leurs aspirations au développement. Seule une contrainte, provoquée par une grave pénurie d'énergie par exemple, semble pouvoir changer la donne dans ce domaine. En tout cas, les restrictions semblent inévitables dans un avenir proche.

Nous pourrions développer tous ces thèmes qui sont parfois aussi importants que le développement des énergies renouvelables lui-même, mais tel n'est pas notre choix. Cette tâche est immense et nous avons décidé de nous limiter à celle qui consiste à analyser les sources d'énergie renouvelables et à essayer de déterminer dans ce domaine ce qui est bon pour nos besoins et pour la planète.



## 2<sup>ème</sup> partie

# Les énergies renouvelables intermittentes

## Chapitre 1

### L'éolien terrestre, un vecteur d'énergie électrique

C'est le vent qui en est l'énergie primaire, une énergie intermittente, variable et peu prévisible.

L'énergie éolienne n'est pas nouvelle : les moulins à vent existent depuis des siècles, et ont fait très longtemps partie des paysages et du patrimoine, jusqu'au début du 19<sup>ème</sup> siècle. Jusqu'à l'apparition des machines à vapeur, les meuniers se sont contentés du vent qu'il pouvait y avoir et cela leur allait très bien. Mais cette énergie « renouvelable » a été vite abandonnée au profit du charbon et par la suite, d'autres combustibles fossiles utilisables à tout instant.

A la fin du vingtième siècle, on a imaginé d'utiliser à nouveau cette source d'énergie pour produire de l'électricité.

Evoquons d'abord le **petit éolien domestique** : il est très peu souvent choisi par les particuliers, parce que les aides ou subventions de l'Etat ne suffisent pas à atteindre une rentabilité économique dans la majorité des cas. Il a un faible potentiel, est sensible à la foudre et surtout dérange le voisinage. Enfin, si on les installe sur toiture, il est patent que les éoliennes domestiques font vibrer les bâtiments.

#### L'éolien terrestre industriel.

Très souvent, les éoliennes industrielles, qui atteignent à certains endroits 200 m de haut et s'élèveront sans doute dans l'avenir jusqu'à 300 m, symbolisent les EnR dans leur ensemble : on en voit sur le bureau de tel ministre, on les situe en arrière-plan de beaucoup de documents publicitaires, de sujets à la télévision. Ce sont comme des messages subliminaux. C'est ce à quoi pense d'abord l'homme de la rue lorsqu'on lui parle d'énergies renouvelables.

Et pourtant, aucune EnR n'a rencontré autant d'opposition : il y a en France des milliers d'associations qui luttent contre des projets d'installation d'aérogénérateurs, notamment par des recours juridiques (la plupart des projets sont suivis de recours par des centaines d'associations adhérentes à des fédérations nationales (Notons aussi que de nombreux recours sont déposés par les opérateurs mécontents d'avoir essuyé un refus). Cela gêne les pouvoirs publics et les opérateurs. Que penser de cet aspect des choses ? Nous verrons plus loin pourquoi ce type d'énergie est rejeté, bien plus que les autres.

Objectivement, une éolienne peut produire de l'énergie, sous certaines conditions : qu'il y ait du vent, que celui-ci soit à une bonne vitesse (50 km/h et jusqu'à 90 km/h, mais pas davantage parce qu'on est obligé d'arrêter les machines : ce serait trop dangereux). Il arrive souvent qu'il n'y ait pas de vent et même parfois sur des périodes un peu longues, de quelques jours à une quinzaine.

Pour être plus précis, la relation entre la vitesse du vent et la production éolienne est loin d'être linéaire.

Schématiquement, la production d'une éolienne évolue de la façon suivante :

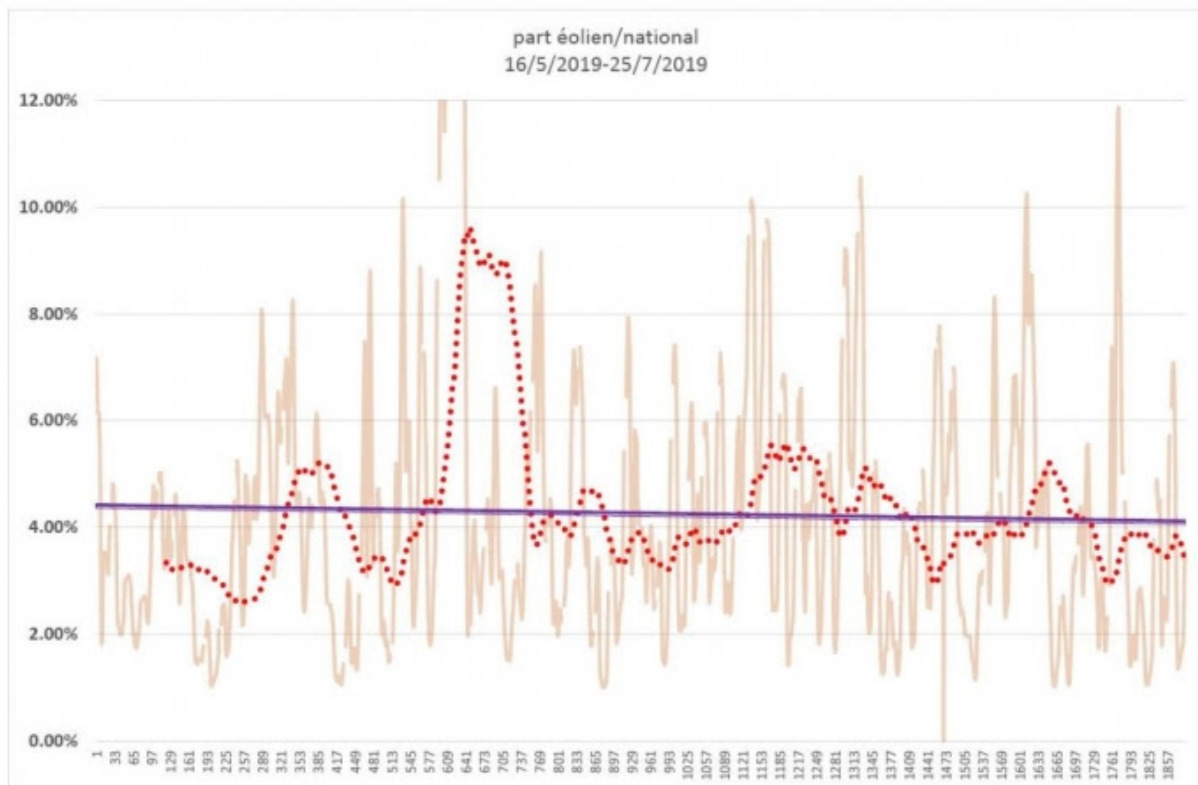
- Si le vent est inférieur à la vitesse de démarrage (environ 10 km/h), la production est nulle
- Entre la vitesse de démarrage et la vitesse nominale (environ 50 km/h), la production augmente rapidement avec la vitesse du vent,
- Au-delà de la vitesse nominale, la production reste approximativement constante...

Jusqu'à la vitesse de coupure (autour de 90 km/h) : alors l'éolienne se met en drapeau et la production cesse. La variabilité du vent, quand il y en a, constitue aussi un problème. Une modification même mineure du régime des vents va avoir un impact disproportionné sur la production : si la vitesse moyenne du vent baisse de 1%, la production d'électricité baissera de 3% environ, si le vent baisse de 5%, la production chutera de 14%.... Donc, à chaque fois que la vitesse double, la puissance est multipliée par 8, idem pour l'inverse.

La variabilité signifie que quand y a du vent, la quantité d'électricité varie suivant le cube de la vitesse du vent !

Donc, très souvent, les trois quarts du temps, il n'y a pas de vent ou pas assez et les machines produisent peu ou pas du tout d'électricité et en période de temps stable, de hautes pressions l'été et l'hiver, elles restent immobiles, en berne.

Les variations de la météo produisent donc d'énormes déficits, mais aussi d'énormes surplus. Un exemple très caractéristique nous est fourni par RTE avec le graphique de la production d'électricité par les éoliennes pendant plus de deux mois en 2019 : 4 % seulement de sa capacité nominale (la moyenne de ce que les éoliennes ont produit comparée à ce qu'elles auraient pu produire en fonctionnant constamment à leur régime nominal pour tout le territoire français) !



Il arrive aussi que la production des éoliennes coïncide avec les besoins du pays, avec les périodes de travail, avec les moments forts de l'économie, de la vie quotidienne. C'est donc utile, mais d'une manière très ponctuelle. Dans ces cas-là, les centrales nucléaires et autres moyens de production pilotables sont obligés de baisser leur production, car l'énergie éolienne est, selon la réglementation, prioritaire sur le marché de l'électricité européen.

Du coup, le matériel de ces centrales nucléaires s'use plus rapidement du fait de la fréquence de la baisse de production et de sa relance en fonction du vent et bien sûr, EDF gagne moins d'argent (on reviendra plus loin sur ce sujet), ce qui peut avoir un impact à long terme sur ses dépenses de sécurité.

Ainsi la plus grande partie du temps, il faut recourir à une puissance fossile ou fissile d'urgence, de réserve, déclenchée en cas d'absence de vent. En Allemagne, « en avance » par rapport à la France pour le nombre d'éoliennes, cette réserve, produite pour moitié par des centrales au charbon correspond actuellement à 88 % de la puissance installée en énergie renouvelable (à noter toutefois que l'Allemagne a prévu de les remplacer à terme par des centrales au gaz, moins polluantes. C'est ce qu'on appelle un « mariage forcé » de l'éolien avec le gaz. Autrement dit, l'Allemagne doit installer et entretenir deux systèmes de production parallèles. C'est ce qui nous attend en France si, comme il est prévu par la PPE (programmation pluriannuelle de l'énergie), on multiplie par trois le nombre des éoliennes et qu'on baisse notablement le nombre de centrales nucléaires. Dans ce cas, il faudra ajouter des centrales au gaz chaque fois qu'on installera de nouvelles centrales alimentées par des énergies intermittentes. En d'autres termes, il faudra des énergies de substitution, soit nucléaires si on garde les centrales existantes, soit à gaz, émettrices de CO<sub>2</sub>, ce qui serait contraire à l'objectif de lutte contre le réchauffement climatique.

C'est le principal inconvénient de ces machines intermittentes et variables qui trop souvent, produisent quand on n'a pas besoin d'électricité et trop souvent sont dans l'impossibilité de produire quand on en a besoin.

Cette insuffisance originelle constitutive, devrait cantonner, réduire l'éolien à une source d'énergie d'appoint. Mais ce n'est pas ce qui a été prévu.

Compte tenu de la nécessité de maintenir l'équilibre de la consommation et de la production d'électricité (faut de quoi ce serait le clash, le black-out), les autres sources d'énergie sont donc appelées à assurer l'approvisionnement sans l'apport de l'éolien, en période de pointe. En d'autres termes, **RTE (Réseau de Transport d'Electricité) est obligé de prévoir... de s'en passer assez souvent.**

Faute qu'on puisse la stocker à l'échelle d'un pays, à certains moments, le surplus de cette énergie est perdu, ou vendu à perte (à prix négatif) aux pays voisins où les conditions météo sont souvent comparables à celles de la France au même moment, et où existe donc également déjà un surplus de production d'électricité éolienne. Lors de week-ends particulièrement venteux pendant lesquels les besoins en énergie sont très faibles, la production d'énergie éolienne est intégralement facturée au prix fort à EDF, et par voie de conséquence aux usagers.

La question de l'énergie produite pour rien, qui concerne toutes les énergies intermittentes, est particulièrement cruciale pour l'éolien industriel, en raison de l'impossibilité de stockage à grande échelle. C'est pourquoi, pour simplement exister, il lui faut un très fort soutien des pouvoirs publics.

En effet, nos dirigeants ont imaginé de donner à l'éolien la priorité devant les autres sources d'énergie ; en lui allouant de surcroît la plus grosse part des subventions prévues pour les EnR.

### **Les conséquences budgétaires**

Dans la perspective de la lutte contre le réchauffement climatique, la question du coût de cette source d'énergie est passée au second plan. Il n'est pas question de faire des économies ? Non, bien au contraire, car le tarif de rachat de l'électricité éolienne par EDF est bien supérieur à celui du marché et ce soutien est financé par le biais d'une taxe imputée sur leur facture d'électricité, et d'une taxe sur les carburants.

Elles dépassent aujourd'hui 20 % du montant de la facture des usagers et ne pourront qu'augmenter fortement si la politique nationale continue dans cette voie.

En termes d'investissement, cela atteint des sommes astronomiques : plus de 150 milliards d'euros (121 milliards à fin 2017, selon la Cour des comptes), auxquels s'ajoutent 25 Mds pour les raccordements offshore ce qui fait 5 milliards, ce qui, avec quelques autres dépenses, permet d'atteindre 200 milliards, qui désormais sont financés et suivis dans le programme budgétaire 345, la partie raccordements relevant du TURPE (tarif d'utilisation du réseau public d'électricité) qui avec les charges d'exploitation de RTE et d'Enedis représente environ 1/3 de la facture d'électricité, les deux autres tiers étant les frais d'exploitation, plus la marge de l'opérateur et les taxes.

En termes de fonctionnement, l'éolien industriel a un impact significatif sur le marché de l'énergie par la surproduction et le manque de production. La surproduction a pour effet de faire s'effondrer les prix du marché et le manque de production provoque leur envolée. L'éolien ne risque rien financièrement puisque la vente de son électricité est garantie, à un prix garanti, mais cette instabilité est préjudiciable aux moyens de production mobilisables, car la volatilité des prix entraîne l'hésitation des investisseurs.

**Comment cela fonctionne-t-il financièrement ?** Les mécanismes d'obligation d'achat (OA) et de complément de rémunération (CR) garantissent aux producteurs d'EnRi une rémunération confortable, quel que soit le prix de l'électricité dans les différentes bourses (marché spot et marché à terme). Cependant, une différence existe entre OA et CR : avec le CR, le producteur peut gagner encore plus d'argent, s'il boursicote habilement, soit directement sur le marché, soit par l'intermédiaire d'un agrégateur (Enercon par exemple, avec fonds allemands, ou encore EDF).

Dans tous les cas, EDF rémunère le producteur, ou l'agrégateur, et est remboursé par l'Etat, avec retard (par la Caisse des dépôts et consignation). Avec le CR, un producteur a intérêt à ne vendre sa production que si le prix de l'électricité est intéressant, c'est-à-dire si la demande dépasse l'offre à la bourse ; il a intérêt à ne rien produire, même si le vent est bien, entre 50 km/h et 90 km/h par exemple, et à mettre ses machines à l'arrêt ou en roue libre, dans les cas où le prix est négatif. Au final, c'est nous qui payons, en tant que consommateurs et citoyens, par l'impôt direct et par la CSPE.

Voir : <https://www.ecologie.gouv.fr/dispositifs-soutien-aux-energies-renouvelables>

### **Et pour quel résultat ?**

En France, l'énergie éolienne produite en 2019 a été de 34,1 TWh, soit 6,3% de la production électrique française, ce qui est très peu, alors que déjà 8000 éoliennes sont construites en France. Il est d'ores et déjà évident que les éoliennes ne pourront pas couvrir les besoins nationaux.

En d'autres termes, l'éolien ne sert pas à grand-chose, mais jouit d'un préjugé favorable surtout dans les grandes villes qui ne subissent pas leurs nuisances, préjugé qui repose sur toute une littérature et une imagerie diffusées par l'Ecologie politique, les « Verts », mais pas seulement, puisque nombre d'associations et d'ONG d'envergure lui

sont restées favorables, (Négawatt, WWF, GreenPeace...), les lobbyistes de l'éolien, très heureux de cette aubaine, et même certains milieux gouvernementaux !

### **Comment les partisans de l'éolien industriel le défendent-ils ?**

Ils avancent souvent la thèse du « foisonnement », selon laquelle lorsqu'il n'y a pas de vent dans une région, il y en a dans une autre, ce qui permettrait de suppléer à la carence locale. La réalité est autre : en 2018, une étude du VGB Power Tech a été menée sur 18 pays européens. Elle montre que le plus souvent, il y a « en même temps » soit beaucoup, soit peu de vent, un peu partout en Europe. La conséquence est redoutable : on ne peut compter sur les éoliennes ni pour assurer la sécurité d'alimentation du pays, ni pour importer de l'électricité éolienne des pays voisins, qui ont de fortes chances au même moment d'être soumis aux mêmes manques de vent.

Une étude du Céréme menée sur 8 spots éoliens européens au long de l'année 2020 démontre également qu'il n'existe pas de foisonnement.<sup>1</sup>

Ils utilisent aussi l'argument du « produire local » : c'est une grosse fumisterie puisque les producteurs envoient leur électricité sur le réseau qui est européen. Les électrons ont encore moins de patrie que les financiers. Ils utilisent encore l'argument : « associer la population aux bénéficiaires ». C'est vrai qu'avec des taux de rendement de 6% et plus, sur les plateformes de « crowdfunding », c'est mieux qu'avec le livret A, même s'il y a des risques. Mais ce n'est toujours qu'une infime partie des bénéficiaires qui peut être reversée aux particuliers par ce biais, le plus gros allant aux opérateurs boursiers habituels. D'un côté, quelques-uns font un petit profit avec leur petit investissement, mais de l'autre côté tout le monde paie son électricité beaucoup plus cher tandis que paysages et biodiversité sont ruinés.

<sup>1</sup> [https://cereme.fr/wp-content/uploads/2021/06/Cereme\\_fiche-pedagogique-3\\_eolien-et-foisonnement.pdf](https://cereme.fr/wp-content/uploads/2021/06/Cereme_fiche-pedagogique-3_eolien-et-foisonnement.pdf)

Dernier argument : ils assurent que leurs machines produisent un MWh à un prix plus bas que celui des centrales nucléaires. C'est faux si on prend en compte le coût du raccordement des éoliennes au réseau, payé par nous par le biais du TURPE. C'est encore plus faux si on prend en compte le coût des centrales à combustible fossile qu'il faut maintenir ou construire pour pallier la variabilité et l'intermittence des éoliennes.

Les conséquences budgétaires sont importantes, et les conséquences environnementales ne le sont pas moins.

### Conséquences environnementales

Les partisans de l'éolien industriel terrestre oublient trop souvent les dégâts importants qu'ils provoquent sur la faune sauvage : les opérateurs minimisent largement les mortalités d'oiseaux et de chauves-souris. Or selon « *Save the Eagles international*, » ce sont 200 oiseaux par an par éolienne qui meurent chaque année, et 400 chauves-souris, en Espagne (chiffres donnés par la « LPO » espagnole). Très souvent, de nombreuses espèces protégées sont touchées, car on plante les éoliennes, notamment dans les moyennes montagnes, là où celles-ci ont trouvé refuge. Dans un contexte législatif de reconquête de la biodiversité, cela est inacceptable.

La mortalité des chauves-souris est deux fois plus nombreuse que celle de l'avifaune.

Selon les ornithologues, les problèmes majeurs de l'impact des éoliennes sur l'avifaune sauvage sont, outre les risques de mortalité par collision, la sensibilité au dérangement, une fatigue extrême en cas de contournement des parcs éoliens qui se succèdent, créant un « effet barrière », et surtout la perte des territoires de chasse (ou perte d'habitat) qui a des répercussions sur leur reproduction et leur pérennité.

D'autres animaux sont aussi victimes des éoliennes : le bétail est perturbé par le voisinage des aérogénérateurs (mortalité des bovins, veaux difformes à la naissance...).

Mais surtout, les êtres humains ne sont pas épargnés : une proportion non négligeable des riverains d'éoliennes souffrent de troubles importants, dus aux bruits, aux infrasons, aux vibrations des pales contre les mâts des éoliennes..., d'où des insomnies, des dépressions, des acouphènes... Le voisinage de ces machines est tout à fait désagréable, même au-delà des 500 m de distance réglementaire : on peut entendre un parc éolien à 2,5 km de distance, et en souffrir fortement.

Les normes acoustiques ne sont le plus souvent pas respectées d'ailleurs, en raison de la complexité de la réception des sons (relief, végétation, vents dominants...).

### Près de Fruges (Pas-de-Calais)





Tous les promoteurs éoliens admettent aussi que la problématique des paysages subsiste avec les machines : de beaux sites paysagers sont complètement défigurés : on ne peut pas intégrer dans un paysage des machines aussi hautes (et qui tournent !). C'est grave.

Pour avoir une idée plus complète des nuisances, on peut se reporter à l'expérience du maire d'une commune des Hauts de France dont l'environnement a été envahi par plus de 200 éoliennes (c'est le maire de Montcornet dans l'Aisne).

<https://ventsetterritoires.blogspot.com/2019/07/aisne-montcornet-le-maire-lance-un-cri.html?m=1>

### La question du recyclage

Le reproche qu'on peut faire aussi à l'éolien est qu'il n'est pas possible de recycler les pales qui sont en matériaux composites. Les pales, en fin de vie, sont incinérées ou enfouies, ce qu'on appelle le « **downcycling** » aux USA. Deux solutions pas très écologiques pour des monstres de 25 tonnes.

Avec le démantèlement programmé de plusieurs centaines d'éoliennes chaque année en France, c'est un véritable défi écologique qui se pose. Selon l'ADEME, ce sont 15 000 tonnes de matières composites issues des pales qui devront être traitées rien qu'en 2029. En Europe d'ici à 2030, cela fera 375 000 tonnes.

D'autres effets sur l'environnement sont moins connus, mais tout aussi nuisibles : C'est d'abord la quantité désastreuse de béton qu'il faut pour les installer, et ensuite la grande quantité de métaux rares issus de minerais qu'il faut chercher dans tous les coins du monde. L'éolien nécessite d'extraire de l'aluminium, du chrome, du cuivre, du fer, du plomb, du zinc, du manganèse, du nickel, du molybdène et du néodyme (celui-ci étant indispensable aux aimants sans lesquels les éoliennes ne pourraient même pas exister). Sait-on que pour une seule éolienne, il faut 1,4 tonne de cuivre en moyenne ? Ces minerais sont souvent extraits dans des conditions épouvantables, et surtout s'épuisent (le cuivre est arrivé en 2020 à son pic de production).

Sait-on qu'un mégawatt-heure d'éolien « consomme » 8 fois plus de béton, 20 fois plus d'aluminium et de cuivre, 26 fois plus d'acier qu'un mégawatt-heure nucléaire ? (compte-tenu de son intermittence et de la durée de vie de ses installations).

C'est la « face cachée des énergies vertes » sur laquelle nous reviendrons plus loin.

Le downcycling aux Etats Unis (En France, selon FEE, on les incinère)



## Conclusion

La première conclusion, c'est que si on voulait se contenter des énergies renouvelables électriques (essentiellement intermittentes et majoritairement éoliennes), il faudrait accepter des coupures de courant ou un rationnement de l'électricité à certains moments. Il est peu probable que cette option reçoive l'assentiment des populations et des industriels.

De ce fait, et c'est la deuxième conclusion, il faut compléter les éoliennes par des installations de substitution, fonctionnant notamment au gaz. Pour le coup, c'est un grand raté du point de vue écologique et financier.

C'est ce que disait M. Mestrallet, Président d'Engie (GDF-SUEZ), société fortement impliquée dans l'éolien en France : il mettait clairement en garde, dès le 8 juin 2011, contre la séduction qu'exerce sur l'opinion publique les énergies renouvelables : "ce sont des énergies intermittentes qui vont nécessiter de grandes capacités de réserves qui vont reposer sur le gaz naturel. On va payer trois fois. D'abord parce qu'il faudra construire deux systèmes (éolien-gaz) ; deuxièmement, car il faudra subventionner les éoliennes ; troisièmement, les turbines gaz vont fonctionner seulement 70% du temps et le coût du MWh va être augmenté d'autant. Outre le prix élevé, le système éolien-gaz va générer des gaz à effet de serre 70% du temps. C'est donc un système pollueur".

**Alors pourquoi continuer à développer l'éolien ? Il vaudrait mieux consacrer les efforts (et les recherches) à d'autres sources d'énergie plus fiables, voire plus économiques.**

## L'éolien offshore ou maritime

Ces types d'éoliennes sont installés en mer pour moins déranger les habitants. Cependant elles sont d'une autre échelle : visibles de la côte parce que beaucoup plus hautes, plus puissantes, et plus nombreuses que les éoliennes terrestres, pour chacun des parcs. Leur production est plus élevée et plus régulière, car les vents maritimes sont plus forts et réguliers : leur facteur de charge peut atteindre un maximum 35-39 % en Mer du Nord (contre 24% pour les éoliennes terrestres en moyenne).

Il existe deux sortes d'éoliennes en mer : celles dont le mât est posé et fixé sur les plateaux continentaux pas trop profonds (30 m environ), à environ 10 km des côtes, et les éoliennes « flottantes », fixées sur une barge carrée de béton percée d'un trou en son milieu d'un poids de 4000 tonnes, qui peuvent s'abstraire des profondeurs sous-marines, puisqu'elles sont amarrées par des câbles et flottent en mer sur une plateforme en béton ou en acier (technique inspirée des plateformes pétrolières). On peut donc les installer plus loin, entre 15 et 20 km des côtes. Une première expérimentation au monde d'éoliennes flottantes, appelée « fermes pilotes », aura lieu au large de Gruissan-Leucate (Aude) où 4 éoliennes seront installées en 2021 ou 2022, après un prototype installé au large de St Nazaire. (à l'heure où nous écrivons).

Nous n'en connaissons pas tout à fait les effets sur l'environnement. La mer n'est pas un espace vide et il y aura un impact sur le milieu marin (poissons et crustacés), mais aussi sur la faune migratrice, qu'il est difficile d'évaluer tant qu'une étude (prévue en 2022) ne sera pas réalisée. On sait déjà que les oiseaux migrateurs et les chauves-souris migratrices pourraient être impactés, voire subir une forte mortalité (comme pour les éoliennes terrestres), et les cétacés (cachalots, baleines...) seraient perturbés par les infrasons et perdraient leur capacité de communication et d'écho-localisation, ce qui leur créerait des difficultés pour se repérer, se nourrir et se reproduire ...

Il est certain par ailleurs que des zones de pêche seront supprimées. Du coup, souvent, les pêcheurs s'y opposent, comme à St Brieuc en 2020-2022. La constante toujours vérifiée sur des sites analogues en mer du Nord, c'est une raréfaction grave de la ressource en poissons autour des sites éoliens et une baisse drastique des flottes de pêche (cf. l'exemple de Ramsgate - UK).

Les hollandais viennent pêcher au large de la France parce qu'ils ont perdu des sites de pêche à cause de leurs propres éoliennes en mer ! Enfin, même si le taux de charge des éoliennes offshore est plus élevé que celui des éoliennes terrestres, il n'en demeure pas moins qu'elles fonctionnent de manière intermittente.

## L'Hydrolien

Ce sont les courants qui en sont l'énergie primaire : il existe deux types de courants : les courants marins situés au large des côtes, permanents, par exemple au large de Cherbourg et Brest : la vitesse du courant est supérieure à 12 kms , et les courants de marée ou de marnage, tout près des côtes, intermittents (changement de marée et étale entre deux ) mais tous deux prévisibles à la minute près Une hydrolienne est une turbine sous-marine, qui tourne très lentement, posée dans les fonds sous-marins, à une profondeur minimale de 25 m (la structure est de 20 m de hauteur, et les hélices de 16 m de diamètre).

Les hydroliennes sont beaucoup plus petites que les éoliennes pour une même puissance, car la masse volumique de l'eau est 800 fois supérieure à celle de l'air.

Les hélices tournent entre 10 et 15 tours par minute, soit 10 fois moins que les hélices d'un bateau. Elles n'ont pas d'incidence sur les paysages, et on ne connaît pas la gêne qu'elles occasionneraient sur les animaux marins

EDF estime le gisement, près des côtes françaises, à 3 GW soit l'équivalent de 3 réacteurs nucléaires, ce qui est peu par rapport à nos besoins en énergie.

Le problème est que la maintenance est très lourde : l'érosion des pales par le sable est forte et un projet a été abandonné à cause du matériau qui avait été utilisé, trop sensible à la corrosion (du coup, il faut du matériel anti-corrosion qui coûte cher : ex l'acier inoxydable et le titane)

Le coût d'installation et de l'entretien est pour l'instant de 8 millions d'€ pour chaque MW installé, ce qui est encore prohibitif, et il semble que l'Etat n'octroie pas ou n'accorde pas suffisamment de subventions pour démarrer cette filière.

## L'énergie des vagues

**L'énergie houlomotrice représenterait un potentiel énorme** dans le mix énergétique mondial. Le Conseil mondial de l'énergie estime que **10 % de la demande annuelle mondiale d'électricité pourraient être couverts grâce à cette énergie**. Pour autant, **tous les pays n'ont pas le même potentiel** : certaines régions, comme l'Atlantique Nord, sont particulièrement propices à la récupération de l'énergie des vagues. En France métropolitaine, le potentiel est estimé à 40 TWh/an, principalement sur la façade atlantique (10 à 15 GW).

Selon IFP Energies Nouvelles, pour récupérer l'énergie des vagues, on distingue quatre grandes familles de technologies :

- **Les colonnes d'eau oscillantes** : l'oscillation de l'eau à la surface de la mer agit comme un « piston » qui pousse de l'air dans une chambre. Ce flux d'air sous pression actionne mécaniquement des turbines pour produire de l'électricité. Les installations peuvent être flottantes (en mer) ou fixes (sur le littoral). Cette technologie en est à un stade précommercial.

- **Les systèmes à déferlement** : les vagues viennent se briser sur des rampes inclinées artificielles et se déversent dans des réservoirs surélevés. L'eau actionne une turbine, puis retourne à la mer. Comme pour les colonnes d'eau oscillantes, les installations peuvent être flottantes en mer ou fixes sur le littoral. Ces systèmes sont encore peu nombreux.

- **Les systèmes à flotteurs** : plusieurs corps flottants reliés entre eux sont alignés dans le sens du vent, perpendiculairement aux vagues, et maintenus à la surface de l'eau par des câbles arrimés au sous-sol marin. Les vagues créent une oscillation de la chaîne de flotteurs, ce qui actionne une turbine soit directement, soit par le biais d'un fluide hydraulique comprimé. Les systèmes de ce type en sont à des stades de maturité divers.

- **Les systèmes posés au fond** : fixés sur le fond marin, ils utilisent l'oscillation de l'eau provoquée par les vagues pour mettre en mouvement des corps immergés (volets, bouées, etc.). Ces derniers actionnent à leur tour des systèmes de transformation d'énergie électriques ou hydrauliques (grâce à un fluide qui peut être de l'huile, de l'eau de mer...). Un système de ce type a fait la preuve de son efficacité en envoyant de l'électricité au réseau pendant 24 heures consécutives.

*Cette énergie, variable, est plus facile à prédire que l'éolien et le solaire, mais elle reste freinée par certaines contraintes : Les matériels doivent résister à des conditions parfois extrêmes, tout en offrant une grande fiabilité, et souffrir d'un coût de production élevé (200 à 300 €/MWh aujourd'hui)*

## Chapitre 2

### L'énergie solaire

C'est aussi une énergie intermittente, puisque les installations solaires, par définition, ne fonctionnent que pendant la journée, et bien sûr seulement quand il y a du soleil, mais...

... les centrales solaires ont un profil de production beaucoup plus attractif que celui des parcs éoliens, car les consommateurs ont besoin d'énergie surtout pendant la journée (lorsque le soleil brille), alors que le vent qui peut aller et venir à tout moment de la journée est très aléatoire.

L'énergie solaire bénéficie d'un jugement plutôt favorable. Mais surtout, la plus usitée, le photovoltaïque (PV), est vue, par les particuliers, comme une alternative à l'achat de l'électricité à EDF, puisqu'on peut en installer en autoconsommation et donc tendre vers l'autonomie, en couplant cette production avec des moyens de stockage : batterie, ballon d'eau chaude. Et l'Etat leur alloue aussi de larges subventions.

Cette énergie, à l'utilisation, ne pollue pas, n'émet de gaz à effet de serre, mais il n'en est pas de même pour la fabrication et le démantèlement.

Elle a le grand avantage cependant d'être immobile et surtout non bruyante, elle n'a pas d'effets négatifs sur l'environnement pendant son utilisation, contrairement à l'éolien.

L'énergie solaire permet de répondre à deux types de besoins, à savoir essentiellement la production d'électricité et la production de chaleur.

#### Le solaire thermique

Le plus simple pour récupérer la chaleur du soleil est encore l'utilisation de baies vitrées dans les bâtiments orientés vers le Sud; elles peuvent apporter une chaleur non négligeable surtout en intersaison.

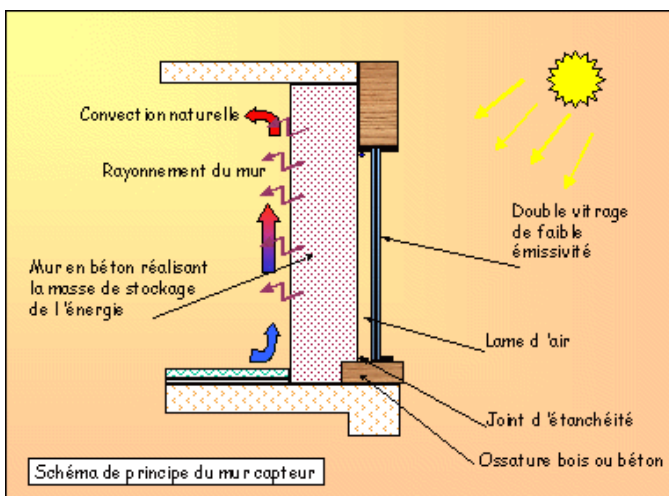
*« Si on expose des objets au rayonnement solaire à travers une paroi de verre, les fréquences correspondant au rayonnement infrarouge sont arrêtées, « piégées » par le verre : c'est ce que l'on connaît sous le nom d'effet de serre (nom également donné, par analogie, au phénomène de réchauffement de l'atmosphère dû aux gaz qui réémettent vers la surface terrestre une partie du rayonnement infrarouge qu'elle renvoie. » (Encycl. Larousse).*

Cet apport peut être renforcé par l'installation de murs capteurs : On installe un double vitrage devant un mur en béton peint de couleur sombre. L'énergie solaire est transmise par conduction à travers le mur puis par rayonnement à l'air de la pièce.

Dans les murs « trombes », solution analogue, des ouvertures sont pratiquées dans le mur pour faire entrer la chaleur dans la pièce quand le besoin s'en fait sentir.

Le solaire thermique par **capteurs** utilise aussi les rayons du soleil de manière directe : c'est une énergie renouvelable consistant à produire de la chaleur ou de l'eau chaude à partir de capteurs solaires, le plus souvent posés sur toiture. Le rendement des panneaux est intéressant : il dépasse aisément 50 %.

Donc, pour la production d'eau chaude sanitaire, chacun peut installer chez soi un chauffe-eau solaire qui peut remplacer pendant une bonne partie de l'année un ancien chauffe-eau électrique (ou à gaz). C'est intéressant. Cependant l'installation est encore coûteuse au départ et nécessite une quinzaine d'années d'amortissement.



De plus, il est possible de raccorder cette production au circuit d'un chauffage central (dans ce cas, c'est un système solaire combiné), en relèvent d'une chaudière quelle qu'elle soit, ce qui permet d'économiser l'électricité (ou le fuel, ou le gaz...). Dans ce cas, le panneau solaire thermique chauffe aussi l'eau d'un ballon au travers duquel passe l'eau du chauffage (*sur le circuit retour*). L'économie d'énergie réalisée dépend de la quantité d'eau stockée dans le ballon, c'est-à-dire de la capacité du réservoir.

Ce qui est possible dans un logement individuel l'est aussi dans des immeubles ou des locaux commerciaux, voire industriels, de quelque taille qu'ils soient...

Il est possible d'utiliser aussi le solaire thermique pour des réseaux de chaleur.

Dans certains pays, le stockage inter saisonnier (voir dans notre chapitre sur le stockage de l'énergie) et la relève par gaz ou pompe à chaleur permet d'assurer plus de 60 % des besoins d'un réseau. Il offre l'avantage d'un coût de la chaleur compétitif grâce aux économies d'échelles réalisées.

## Les panneaux photovoltaïques (ou capteurs solaires) pour la production d'électricité

« Le photovoltaïque est la transformation directe du rayonnement solaire en électricité dans une photopile. L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la capacité d'un matériau semi-conducteur à générer un courant électrique lorsqu'il est percuté par des photons, a été découvert en 1839 par Antoine Becquerel. Il est produit généralement dans des disques de silicium » (ou de multiples autres matériaux) (source : encycl. Larousse)

Il est utilisable à la ville comme à la campagne, en petites (sur un camping-car ou un bateau) ou en grandes installations (au sol, ou sur toitures et parkings de grandes surfaces, sur des ombrières, des toits d'usines ou de bâtiments agricole).

Les panneaux résistent au froid et aux intempéries et ont une durée de vie de 20 à 35 ans. Si on ajoute à cela que le coût des installations a fortement baissé du fait de la surproduction en Chine, il ne faut pas s'étonner que beaucoup de particuliers aient adopté cette solution pour

leur propre maison, pour leur propre consommation, avec éventuellement revente du surplus de production à EDF, ce qui permet d'amortir les investissements réalisés lors de l'installation.

Cette énergie bénéficie aussi d'aides de l'Etat, ce qui la rend très attractive pour des particuliers.

De plus, c'est une énergie silencieuse, contrairement à l'éolien par exemple.

Ce tableau serait quasi idyllique s'il n'y avait quelques inconvénients dont le plus important est l'intermittence.



## Inconvénients

Le premier est que les panneaux photovoltaïques voient leurs performances se dégrader avec l'élévation de leur température de surface : la chaleur détériore leurs performances. Plus la température est élevée, plus les photons traversent les cellules photovoltaïques arrachant au passage des électrons aux atomes de silicium et réduisant la production d'électricité. Sous des températures ambiantes de 35 degrés, les cellules peuvent atteindre 80 degrés en surface et perdre jusqu'à 30% de leur rendement. Un panneau photovoltaïque dont la température de surface dépasse 25 degrés perd 0,45% de rendement par degré supplémentaire.

De plus, le soleil ne brille pas de la même manière à Oslo qu'à Ouagadougou. La production n'est possible que pendant la journée (courte ou longue, selon l'endroit où on se trouve et selon les saisons). L'énergie non consommée le jour doit être stockée pour la nuit et pour les moments où le ciel se voile de nuages. C'est un problème récurrent qui concerne toutes les énergies intermittentes. La solution individuelle de stockage est la batterie, qui est source et occasion de pollution (voir à ce sujet la partie de ce livre qui y est consacrée) et est très chère. D'autres solutions existent (production et stockage de chaleur dans des ballons par exemple), mais restent très partielles et demandent encore des efforts sérieux de recherche et de développement en raison du coût et des problèmes de sécurité.

Pour l'instant, même s'il y a eu des progrès importants, les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 20 %, ce qui constitue un handicap important encore en raison de la surface nécessaire pour leur implantation.

Mais la recherche en cours en Pologne, en Grande-Bretagne et en Suisse permet d'espérer de meilleurs rendements ainsi qu'une baisse des coûts de production grâce à la pérovskite (matériau plus écologique (qu'on ne chauffe qu'à 100 °C et pas à 900 !), moins cher que le silicium et donnant de meilleurs rendements), ce qui aurait pour conséquence la miniaturisation progressive des panneaux et un gain appréciable pour la surface d'installation (voir plus loin).

Ce qui est certain, c'est qu'il y a une grande marge de progrès et que contrairement à l'éolien qui, lui, est arrivé à maturité et ne peut gagner en puissance qu'avec l'augmentation de la taille des mâts et des pales, on peut s'attendre à une très grande amélioration dans les années qui viennent.

Par ailleurs, si pendant le temps d'exploitation, le photovoltaïque (PV) n'entraîne pas de pollution, il n'en est pas de même avant et après. Les conditions d'extraction, en Chine ou en Afrique, du silicium et autres métaux lourds (cuivre, chrome, cadmium et tellure) qui sont utilisés pour la fabrication des panneaux photovoltaïques, sont très souvent épouvantables. En outre, ce sont surtout les centrales au charbon chinoises (très polluantes, rappelons-le) qui sont utilisées pour traiter le silicium qu'il faut chauffer à des températures de 900°C, voire davantage. Enfin, les déchets toxiques des panneaux en fin de vie nécessitent un traitement particulier. Une usine est programmée à cet effet en France, mais combien de temps aura-t-il fallu attendre ?

## Les centrales solaires thermodynamiques (appelées aussi « fours solaires à concentration »)

### Le fonctionnement de ces centrales

Les centrales solaires thermodynamiques utilisent une grande quantité de miroirs qui font converger les rayons solaires vers un fluide caloporteur chauffé à haute température. Pour ce faire, les miroirs réfléchissants doivent suivre le mouvement du soleil afin de capter et de concentrer les rayonnements tout au long du cycle solaire quotidien. Le fluide produit de l'électricité par le biais de turbines à vapeur ou à gaz. Il existe plusieurs types de centrales solaires thermodynamiques, dont les centrales à miroirs cylindro-paraboliques et leur variante à miroirs de Fresnel, les centrales à tour et enfin les concentrateurs paraboliques Dish-Stirling (du type Font-Romeu, Odeillo dans les Pyrénées Orientales qui est un système de concentration par foyer.

Nous développerons ce seul exemple : les « **systèmes de concentration par foyer** » : le rayonnement solaire est concentré environ 1 000 fois à destination d'un foyer unique de taille réduite. La température peut atteindre de 500 à 1 000°C. **Dans ces centrales à tour**: des centaines de miroirs suivant la course du soleil (les « héliostats ») réfléchissent et concentrent le rayonnement solaire sur un récepteur central situé au sommet d'une tour, dans lequel circule le fluide caloporteur. La chaleur du fluide est alors transférée à un cycle classique à vapeur pour générer de l'électricité. L'électricité produite grâce à l'énergie solaire thermodynamique devrait être compétitive économiquement face aux énergies fossiles d'ici 10 à 15 ans. L'avantage pour ces installations qui peuvent durer de 25 à 40 ans, c'est qu'elles peuvent aussi utiliser la cogénération, c'est-à-dire l'utilisation de la chaleur résiduelle après génération électrique. De plus, la capacité à stocker de la chaleur rend la production d'électricité moins « saccadée » que la production d'électricité photovoltaïque. C'est le cas à Ouarzazate (au Maroc) où la chaleur stockée permet de produire de l'électricité pendant 6 à 7 heures la nuit.

Mais... il faut un ensoleillement direct, pas une irradiation diffuse. Or l'ensoleillement direct français n'est pas suffisant pour envisager des projets substantiels en métropole. C'est donc plus indiqué pour les zones équatoriales et tropicales, encore que pour celles-ci, le manque d'eau peut constituer un handicap : certaines technologies requièrent une grande quantité d'eau à disponibilité, essentiellement pour

nettoyer les miroirs. Selon les estimations, une centrale à concentration thermodynamique à tour d'une puissance de 50 MW consomme 300 000 m<sup>3</sup> d'eau par an. Cette double contrainte soleil/eau rend délicat le choix de la localisation de ce type de centrales.

En France, c'est tout de même réalisable dans les régions les plus ensoleillées, mais de fait, il y a très peu de réalisations : une à Llo dans les Pyrénées Orientales, et une à Aspres-sur-Buech dans les Hautes Alpes, qui sont en fait des installations expérimentales.

**L'avenir du photovoltaïque** : Parmi les solutions solaires, le photovoltaïque est le principal atout, malgré son actuel faible facteur de charge (20 %) : d'une part, c'est assez simple d'installation, d'autre part, cette solution devrait dans un avenir proche devenir plus rentable et plus simple. Plus simple, parce que les panneaux deviennent de plus en plus performants (les plus récents au silicium en sont à 25 % de rentabilité) et pourront se miniaturiser.

L'abondance de l'énergie issue du Soleil est telle que couvrir 0,05 % de la surface terrestre avec des cellules solaires ayant 20 % seulement de rendement suffirait à couvrir les besoins actuels de l'humanité. Ou encore, est-il dit, 100 km sur 100 km de panneaux dans un désert comme le Sahara.

### Mais reste le problème de l'intermittence.

Le silicium n'est pas directement exploitable puisqu'il n'est pas présent à l'état pur. Il doit donc être extrait de différents minéraux, comme la silice (ou dioxyde de silicium SiO<sub>2</sub>), avant d'être exploité. Pour ce faire, il faut chauffer la matière première dans de puissants fours à arcs (jusqu'à 35 MW) afin d'atteindre des températures en moyenne de 1700 °, mais qui peuvent être parfois supérieures à 3.000 °C, ce qui rend la production onéreuse. Cependant, compte tenu de la surproduction (due à la Chine), les panneaux sont devenus plus accessibles. De plus, la recherche continue et rend les panneaux au silicium de plus en plus rentables.

Mais il semble bien qu'on pourra se passer, peu ou prou, du silicium, dans un délai assez court, puisqu'une autre matière pourrait bien le supplanter rapidement : la pérovskite.

Initialement considérée comme un minéral, la pérovskite (du nom d'un minéralogiste russe, Perovski) désigne aujourd'hui une structure atomique particulière, répandue dans la nature et facile à obtenir en laboratoire.

En 2013 une jeune Polonaise, Olga Malinkiewicz, crée une cellule photovoltaïque en posant une couche de pérovskites par évaporation, et finalement par simple impression à jet d'encre. Du coup, plus besoin de hautes températures pour mettre une couche photovoltaïque, sur tout type de support.

## Autres développement du photovoltaïque

### Vitrage photovoltaïque :

Il s'agit dans des bâtiments à énergie positive, de vitrage opacifiant alimenté par une surface **photovoltaïque**, qui sert de fenêtre, mais aussi de brise-soleil et de store.

Le vitrage s'opacifie en fonction de la luminosité ambiante, tout en conservant la transparence attendue d'une fenêtre. Les cellules photovoltaïques captent la lumière et la transforment **en électricité**. L'énergie produite alimente le système d'occultation ainsi que l'électronique intégrée dans un boîtier de contrôle installé sur la menuiserie.

Le rendement de ces panneaux est moindre que ceux, classiques, des toits, mais cela apporte d'autres avantages, entre autres celui de ne pas avoir à rechercher des surfaces d'implantation.

### Les films photovoltaïques organiques flexibles.

Dans le même ordre d'idées, cette solution – qui se distingue des cellules photovoltaïques classiques au silicium – dispose de solides atouts : sa légèreté, sa souplesse (films flexibles), sa portabilité et le fait qu'elle ne contienne aucun métal rare notamment. Ces films solaires captent l'énergie du soleil sur toutes les surfaces disponibles, comme les bâtiments, serres, mobiliers urbains, parkings, textiles, sacs.

Au bout du compte, cela finit par donner des panneaux solaires légers, souples, efficaces, à taux de transparence et à teinte variables, qu'on peut poser facilement sur un ordinateur, une voiture, un drone, un vaisseau spatial ou un bâtiment, même à l'intérieur... et bon marché.

Les handicaps des débuts de la matière (manque de stabilité, sensibilité à l'humidité) semblent bien avoir été résolus puisque la production industrielle est sur le point de démarrer. Bientôt, une usine, à Wrocław (Pologne), fabriquera 180 000 m<sup>2</sup> de panneaux solaires en pérovskite. Et d'autres doivent suivre en Suisse et en Allemagne.

**Les cellules tandem** : l'idée d'associer le silicium et la pérovskite a abouti aux cellules « tandem » qui apportent des performances supérieures.

Il existe même un prototype de bâche qui recharge la batterie d'une voiture électrique et peut lui donner une autonomie supplémentaire de 8000 km / an : (voiture électrique La Gazelle). En laboratoire, on est allé jusqu'à intégrer des cellules à des tissus et à des vêtements.

### Les nanoparticules

Par ailleurs, l'utilisation de plus en plus fréquente de nanoparticules combinées aux autres matériaux renforce toutes ces possibilités et augmente sensiblement le rendement des panneaux.

### L'agrivoltaïsme :

Les étés étant de plus en plus chauds et secs, les raisins ayant tendance à trop « cuire », quelques viticulteurs ont décidé d'utiliser des panneaux photovoltaïques pour leur faire de l'ombre. C'est une solution avantageuse puisque, en même temps, ils peuvent vendre l'électricité produite. Mais l'inconvénient, c'est que toutes les zones viticoles risquent d'être couvertes de panneaux bleus, ce qui nuirait sensiblement à la beauté des sites.

La solution des panneaux sur les toits et les zones « délaissées » comme les friches industrielles nous paraît bien préférable, d'autant plus qu'il existe une autre solution, expérimentée par l'INRA de Montpellier, qui consiste à créer des haies d'arbres pour faire de l'ombre dans les vignes.

D'autre part, la couverture des serres peut être exploitée, grâce à des panneaux translucides, pour capter la chaleur en même temps qu'on produit de l'électricité.

Mais s'il s'agit de panneaux classiques, sur champ ou sur serre, il y a souvent dévoiement par rapport aux besoins agricoles, en raison des loyers généreux accordés par les opérateurs. Les serres restent trop souvent vides et les cultures abandonnées. On a même assisté parfois à des abus : des agriculteurs ont construit des hangars inutiles, uniquement pour faire poser des panneaux PV. Résultat : des serres solaires gigantesques mais vides depuis des années de toute production, sont devenues le symbole de l'artificialisation des terres agricoles sous des prétextes énergétiques.

## Éléments de conclusion

On voit donc que l'énergie solaire photovoltaïque (que ce soit avec des panneaux au silicium ou à la pérovskite, combinés ou non avec des nanoparticules) est en pleine évolution et qu'on peut attendre, grâce à elle, une très forte progression en matière de production d'électricité. Elle n'est pas arrivée à maturité, loin s'en faut, ce qui n'est pas le cas de l'éolien qui lui, étant arrivé à maturité, risque fort d'ici une décennie ou deux, de tomber dans l'obsolescence.

Il reste que cette source d'énergie électrique intermittente dépend des possibilités de stockage de l'électricité qui sont impossibles à réaliser à grande échelle.

Cependant, une grosse augmentation de producteurs d'électricité privés en autoconsommation très subventionnée aura pour conséquence d'augmenter la somme globale des aides que l'Etat octroie et ainsi le TURPE, évoqué plus haut, que tous les contribuables paient **dans** leur facture d'électricité pour la financer, risque de peser de plus en plus lourd en faveur de ceux qui sont équipés de PV et au détriment des autres qui ne le sont pas.

**Un prolongement du photovoltaïque : Pour la ressource en eau, la collecte de l'eau atmosphérique** pour répondre aux besoins en eau potable (l'atmosphère préserve en permanence plus de 12 900 milliards de tonnes d'eau potable). Le dispositif consiste donc à : capturer la vapeur d'eau de l'air avec de l'hydrogel, généralement la nuit ou le soir ; utiliser la chaleur du panneau pendant la journée, pour entraîner l'évaporation de l'eau atmosphérique capturée hors de l'hydrogel afin de refroidir ce même panneau ; recueillir la vapeur d'eau ainsi formée pour générer de l'eau douce et arroser les cultures. Piste intéressante et, semble-t-il déjà utilisée aux Etats-Unis dans les régions qui subissent des pénuries d'eau.

Au total, le solaire photovoltaïque reste donc handicapé par l'impossibilité de stocker à grande échelle l'électricité produite. Seul le solaire thermique est capable de stocker l'énergie et peut contribuer localement à économiser l'électricité par son utilisation dans les réseaux de chaleur (chauffage de logements, bâtiments et locaux divers et eau chaude sanitaire, l'ECS).

La chaleur est stockable, ce qui constitue un avantage pour le solaire thermique par rapport au photovoltaïque.

Cependant, en matière de photovoltaïque, le développement des solutions individuelles, à savoir des installations en toiture avec autoconsommation (et stockage éventuel par batterie) intéresse beaucoup les particuliers. Il peut jouer en quelque sorte un rôle de délestage pour le réseau national. Il suffirait que le prix des batteries soit divisé par deux (et c'est, paraît-il, ce qu'on peut espérer pour dans quelques années) pour que cette solution décolle. Mais pour l'instant, elle reste peu développée en raison du coût des investissements nécessaires, qui ne sont pas à la portée de tous les particuliers, loin s'en faut.

Selon certains spécialistes, le coût des cellules solaires pourrait baisser de 20 % pour chaque doublement de la production d'électricité photovoltaïque. Si cela se confirme, la part de l'électricité solaire pourrait atteindre les 20 % en 2030 (contre 2,8 % fin 2018), mais en intermittence, rappelons-le.

Notons aussi que les panneaux photovoltaïques actuels contiennent pas moins de dix métaux rares.

Par ailleurs, nous ne sommes pas favorables aux vastes champs photovoltaïques sur le sol, notamment sur des terres agricoles et des garrigues tels qu'ils commencent à apparaître un peu partout en France. Cela dénature les paysages d'une part, et d'autre part diminue les surfaces cultivables.

Le photovoltaïque doit être réservé aux toitures ainsi qu'à certaines zones délaissées (friches industrielles entre autres) et à des parkings de zones commerciales par exemple (ombrières).

L'ADEME a fait un calcul des possibilités qui, selon le rendement actuel des panneaux, permettrait d'installer une puissance de plus de 400 gigawatts (pour mémoire, puissance installée actuelle : 8,7 GW).

Au total, le solaire photovoltaïque est critiqué comme l'éolien, pour son intermittence et la forte consommation de métaux rares.

Cependant, il a plus d'arguments en sa faveur à faire valoir, à cause de la plus grande variété de ses usages possibles, de ses possibilités d'améliorations plus importantes, de ses moindres inconvénients pour ses riverains et surtout dans les pays du Sud : il est très rentable à partir du Sud de l'Espagne.

## Chapitre 3

### Le stockage de l'énergie

L'idée est répandue que, si l'on parvenait à stocker convenablement l'électricité, alors il suffirait de stocker la production des énergies alternatives lorsqu'elle est excédentaire pour la réutiliser lorsqu'elle redeviendrait utile et améliorer ce faisant sa valorisation et donc la compétitivité de la filière considérée. Malheureusement cette façon de voir relève assez largement du sophisme.

*« Le stockage a nécessairement un coût : coût d'investissement, coût d'exploitation et renchérissement du kWh restitué lié à une efficacité toujours inférieure à 1 et oscillant selon les technologies entre 25 et 95 %. Ce coût s'ajoute au prix de l'électricité stockée et vient donc le renchérir.*

*La panoplie des solutions de stockage comprend les stations de pompage/turbinage (STEP), les stockages thermodynamiques (CAES (Compressed Air Energy Storage)) à air comprimé et systèmes dérivés), les batteries, les super-condensateurs, les piles à combustible rechargeables, les bobines supraconductrices (SMES), les volants d'inertie, etc. sans oublier les modes de stockage indirects et hybrides : chauffe-eau à accumulation et autres*

*stockages thermiques, hydrogène, lingots d'aluminium ou autres produits finis ou semi-finis.* » (Jean-Pierre Hauet, article extrait de la Revue de l'électricité et de l'électronique).

Il faut savoir, d'emblée, qu'il n'y a qu'une seule solution de stockage de l'électricité utilisée intéressante à l'échelle industrielle : ce sont les **STEP** (Stations de Transfert d'Énergie par Pompage) qui représentent la plus grande partie du stockage (99 % de la capacité de stockage de l'énergie électrique dans le monde). Elles complètent des barrages-réservoirs (ou barrages-lacs). Elles sont composées de deux réservoirs séparés verticalement. L'eau du réservoir aval est pompée jusqu'au réservoir amont durant les périodes creuses, donc souvent de nuit) afin de stocker sous forme gravitaire l'électricité prélevée.

Cette solution bien entendu n'est possible que près des barrages de montagnes. En France, la possibilité d'en installer de nouvelles est très réduite.

## Le stockage de l'électricité

**Le stockage par air comprimé :** Les installations s'appellent des CAES (Compressed Air Energy Storage). Il en existe trois sortes selon qu'on stocke l'air comprimé en sous-sol ou en surface et selon les techniques utilisées (avec chaleur ou isotherme). Il existe très peu d'installations dans le monde, le stockage dans des cavités souterraines ou dans des anciennes mines n'étant pas simple, et pour celles qui sont envisagées en surface, elles prennent beaucoup de place.

**Le stockage inertiel :** c'est un système de stockage d'électricité sous forme d'énergie cinétique. L'énergie est stockée par le biais d'un disque ou d'un rotor, tournant sur son axe dans un environnement visant à minimiser les frottements : enceinte sous vide et utilisation de paliers généralement magnétiques pour la liaison rotor/stator. Le couplage de la masse tournante à un générateur/alternateur permet de stocker et produire l'électricité. Mais l'énergie disponible n'est pas très élevée. En revanche, le coût d'investissement l'est.

**Le transfert d'énergie par lest :** Un lest est relié à une plateforme flottante, à l'aide d'un câble. Pour stocker de l'énergie, le lest est remonté à la surface (de la mer), entraîné par un moteur électrique ; pour déstocker l'énergie, le lest descend en entraînant une génératrice. Pas simple non plus en raison de la profondeur nécessaire et du coût de la transmission de l'énergie.

Une variante terrestre : une grue à six branches lève des blocs de béton de 35 tonnes et les empile comme dans un Lego géant pour former une tour. Pour restituer l'énergie et produire de l'électricité, la grue redescend les blocs de béton un par un pour reformer une seconde tour à l'extérieur de la première. L'inconvénient est que la grue et la tour de béton d'une hauteur de 120 mètres ne passeront pas inaperçues dans le paysage. Pour éviter cet inconvénient, on a imaginé d'utiliser d'anciens puits de mine.

**Le stockage par pompage thermique :** Le stockage de l'électricité est réalisé grâce à deux enceintes de matériaux réfractaires, respectivement à haute (entre 500 °C et 800 °C selon les technologies) et à basse température (entre -160 °C et -80 °C selon les technologies), qui servent de source chaude et de source froide à un cycle thermodynamique. Le stockage d'énergie est réalisé sous forme de chaleur sensible, en exploitant des variations de température dans le matériau. Faible maturité. Aucun retour d'expérience.

**Le stockage électrostatique :** Conçus sur le principe de base des condensateurs, les super condensateurs stockent l'énergie sous forme de champ électrique créé entre deux électrodes, avec comme différence de pouvoir atteindre des densités d'énergie et de puissance bien plus importantes, proches de celles des batteries, tout en bénéficiant d'un temps de recharge très court. Mais le temps de décharge étant court (24-48 h), l'énergie disponible est faible et ce type d'équipement est cher.

**Font aussi partie de ces exemples de stockage peu productifs (à l'échelle collective) :**

**Le stockage électrochimique (les batteries) :**

Il en existe de multiples : plomb-acide, nickel-zinc, zinc-air, sodium-soufre, zébra, lithium-ion et des batteries « à circulation » : zinc-bromine et vanadium-vanadium...

Nous ne pouvons faire un exposé complet sur chacune d'entre elles. Les batteries lithium-ion sont les plus efficaces, remportent les suffrages les plus nombreux, à telle enseigne que le coût du lithium est en augmentation constante au fil des ans, ce qui fait qu'on comprend mal les prédictions de baisse de coût des batteries de l'ordre de 50 % d'ici à 2030 par certains bureaux d'études et institutions, dont l'ADEME. Y aura-t-il assez de lithium dans le monde pour satisfaire les besoins ? Il est permis d'en douter puisque le prix qui était de 2920 \$ la tonne en 2002 et de 6995 \$ en 2015, est passé à 16 550 \$ en 2018 : selon la US Geological, avec une production globale de 37 tonnes par an, le monde aurait assez de réserves pour 365 ans (mais à condition que la demande reste la même). Or les experts prédisent que vers 2040, le monde aurait besoin de 800 tonnes par an, rien que pour la production de batteries (c'est-à-dire sans compter les smartphones, tablettes et nombreux autres objets « connectés ») !

En fait, des réserves existent, mais sont disséminées dans la nature. Le problème est surtout qu'il n'y a pas suffisamment de mines ouvertes.

Actuellement, du fait de l'insistance des gouvernements à mettre en oeuvre la mobilité électrique, il y a un décalage entre la demande et l'offre.

Notons qu'à Soulz-les-Forêts, lieu d'expérimentation de la géothermie profonde par excellence, où des forages existent à des profondeurs d'environ 1600 m pour produire de l'électricité, du lithium a été découvert en grande quantité, ce qui n'était pas prévu. Une capacité d'1/10ème de la demande française.

Nous savons qu'actuellement les constructeurs automobiles envisagent de privilégier les voitures électriques à batterie (25 millions en 2025 selon les prévisions) au détriment des véhicules à hydrogène (piles à combustible).

On sait qu'il sera très difficile d'obtenir une autonomie des voitures supérieure à 400 km, sauf si les chercheurs réussissaient à mettre au point les batteries lithium tout-solide (auquel cas cette autonomie pourrait être portée à 800 km), mais selon eux, rien n'est sûr et on ne le saura pas avant 2030 dans le meilleur des cas. On reste donc dans une grande incertitude quant à l'efficacité des batteries dont l'utilisation pour le stockage à grande échelle est de ce fait quasi inexistante.

Pour être plus précis, des progrès considérables ont été obtenus en laboratoire, pour des solutions diverses comme les batteries nickel-cadmium, d'autres au nickel-métal hydrure, au fluorure (10 fois plus denses et plus autonomes), au lithium-air (plus légères et aux performances supérieures), ou encore sodium-ion qui aurait

l'avantage de poser moins de problème pour l'approvisionnement en matière première, de même, comme déjà indiqué, que la batterie lithium-ion solide, mais on est encore loin de la fabrication industrielle et de la mise sur le marché, ce qui laisse de beaux jours à l'actuelle batterie lithium-ion (liquide).

La batterie lithium-soufre s'annoncerait également. Par rapport à celle au lithium-ion, elle pourrait stocker 5 fois plus d'électricité à poids égal, mais là encore, la mise au point demandera du temps.

Puisque nous venons de l'évoquer, le poids des batteries joue un rôle. La voiture Tesla, réputée avoir une autonomie de 800 km, a des batteries qui pèsent deux fois plus que celles de la Zoé.

En tout état de cause, la batterie au lithium est aujourd'hui la solution par défaut. Il serait plus intéressant de développer la batterie au sodium qui demande beaucoup moins de matériaux critiques pour sa fabrication.

La révolution technologique en matière de batterie tarde à venir.

## **L'hydrogène est l'élément le plus simple et le plus abondant dans l'univers : 93% de la matière.**

Bien qu'il existe à l'état naturel dans l'écorce terrestre, l'hydrogène est aujourd'hui produit industriellement et en grande quantité : chaque année, l'industrie mondiale en consomme plus de 75 millions de tonnes dont près de la moitié (45%) sont utilisées pour le raffinage et la désulfuration du pétrole. L'autre moitié sert principalement à produire de l'ammoniac, lequel est utilisé comme matière de base dans le secteur de la chimie, notamment pour la production d'engrais. Mais l'hydrogène est aussi employé dans l'industrie alimentaire, l'électronique, la métallurgie et l'industrie spatiale où il entre dans la composition du « carburant » des fusées.

Contrairement aux énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon), l'hydrogène **n'est pas** une énergie primaire, mais un « **vecteur énergétique** » qui, comme l'électricité, est produit à partir d'une autre source d'énergie.

Toutefois il a l'avantage de posséder des propriétés énergétiques remarquables ce qui explique son intérêt. C'est le vecteur énergétique qui dispose de la plus grande densité massique : par kilo, il contient 2,2 fois plus d'énergie que le gaz naturel, 2,75 fois plus que l'essence et 3 fois plus que le pétrole. Cependant, c'est le gaz le plus léger, ce qui complique son stockage. Pour l'entreposer, le transporter et le distribuer, il faut soit le liquéfier à une température extrêmement basse (- 253 °C), soit le comprimer à très haute pression (700 bars) et ces opérations sont très énergivores : sa liquéfaction, par exemple, consomme 10 à 13 kWh d'électricité par kg.



Pour l'essentiel, il y a **deux sortes d'hydrogènes** : **l'hydrogène gris** fabriqué par **vaporeformage** et **l'hydrogène vert fabriqué par électrolyse** (mais on verra plus loin qu'on utilise d'autres techniques et d'autres couleurs).

## L'hydrogène gris

Aujourd'hui, plus de 95 % de l'hydrogène consommé dans le monde est extrait des combustibles fossiles, principalement du gaz naturel, sous l'action de la vapeur d'eau surchauffée. Des catalyseurs métalliques sont utilisés (nickel, fer, chrome, cuivre) pour faciliter les réactions. Cette technique appelée vaporeformage nécessite de porter le mélange gaz – vapeur à très haute température : entre 700°C et 1.000°C.

Elle est donc énergivore et s'accompagne d'une importante émission de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) : pour chaque tonne d'hydrogène, 10 à 11 tonnes de CO<sub>2</sub> sont produites et en général émises dans l'atmosphère. Dès lors, la production mondiale d'hydrogène est responsable de l'émission d'environ un milliard de tonnes de CO<sub>2</sub> chaque année.

L'hydrogène peut aussi être fabriqué par gazéification du charbon, mais cette méthode, également très grande émettrice de CO<sub>2</sub>, reste, heureusement, relativement minoritaire dans le monde.

Le vaporeformage est le procédé actuellement le plus économique pour produire l'hydrogène. Son coût évalué à 1,5 €/kg est cependant 3 fois plus élevé que celui du gaz naturel.

## L'hydrogène vert

L'hydrogène est présenté à grand renfort d'annonces comme solution d'avenir dans les médias, s'il s'agit d'hydrogène « décarboné » ou encore d'**hydrogène « vert »** :

L'hydrogène vert est produit par électrolyse de l'eau. Il s'agit du procédé qui consiste à décomposer l'eau (H<sub>2</sub>O), élément naturel par excellence, en dioxygène (O<sub>2</sub>) et dihydrogène (H<sub>2</sub>) grâce à un courant électrique. L'installation qui permet cette opération s'appelle un électrolyseur.

Si l'électricité utilisée est exclusivement d'origine renouvelable (produite par exemple par des installations solaires, éoliennes ou hydroélectriques), cet hydrogène sera considéré comme « propre » et qualifié de « **vert** ».

## L'hydrogène vert peut être obtenu par pyrolyse

Il peut être obtenu à partir du gaz naturel (qui n'est pas renouvelable) avec une technique utilisée depuis longtemps pour produire du noir de carbone industriel : il s'agit de la **pyrolyse** (craquage thermique en l'absence d'oxygène) du méthane à très haute température, qui dissocie le méthane (CH<sub>4</sub>) en carbone et en hydrogène, sans produire de CO<sub>2</sub>. Cette technique est actuellement étudiée entre autres par la compagnie BASF en Allemagne. Le carbone formé est solide (noir de carbone) et peut donc être stocké, et commercialisé dans la limite des demandes du marché. L'hydrogène est sous forme gazeuse et peut être stocké après compression. Cependant, la molécule CH<sub>4</sub> est particulièrement stable et il faut atteindre des températures de l'ordre de 1400 °C pour la décomposer avec un rendement proche de 100% en un temps suffisamment court. On utilise une torche à plasma électrique.

Une quatrième solution technique existe :

## L'hydrogène bleu

Pour le « décarboner », une possibilité consiste à capter le dioxyde de carbone émis lors du vaporeformage. Ce CO<sub>2</sub> peut alors être utilisé comme matière première dans certaines industries (pour la production de mousses par exemple). Mais la solution la plus fréquemment envisagée est celle du stockage géologique, dans d'anciennes poches de gaz ou de pétrole vides. Une technique appelée CSC (ou en anglais CCS pour Carbon Capture and Storage).

L'hydrogène ainsi décarboné est alors devenu « bleu ». Inutile de dire que l'opération supplémentaire est coûteuse, tant en euros ou en dollars qu'en énergie et qu'aujourd'hui il n'existe presque pas d'hydrogène bleu sur le marché. Seuls quelques projets pilotes ont été lancés dans le monde.

## L'hydrogène jaune

Si cet hydrogène est produit par une proportion importante d'électricité d'origine nucléaire (comme en France), il se verra plutôt attribuer la couleur « **jaune** ».

**Problème** : l'hydrogène « vert » ou même « jaune » est beaucoup plus cher que l'hydrogène gris fabriqué par vaporeformage. Son coût est aujourd'hui de 5 à 6 € par kg, soit environ 4 fois plus que l'hydrogène gris. Raison pour laquelle sa production mondiale est très marginale (moins de 5 % aujourd'hui).

## Rendement médiocre ?

Autre obstacle de taille lorsque l'hydrogène vert ou jaune est envisagé comme solution de stockage de l'électricité d'origine renouvelable : le rendement de l'opération qui consiste à produire de l'hydrogène dans un électrolyseur, à le comprimer à très haute pression, éventuellement à le transporter, puis à fabriquer à nouveau de l'électricité dans une pile à combustible, est médiocre : de 25 à 30 %. Cela veut dire que plus des deux tiers de l'électricité renouvelable produite au départ se sont volatilisés dans l'opération, en pure perte. Alors que des solutions de stockage alternatives comme les batteries ont un rendement bien meilleur, d'environ 80 %, et sont même moins chères.

Il faut aussi maîtriser les risques, car l'hydrogène est un gaz très dangereux : comme il s'agit de la plus petite des molécules gazeuses, les risques de fuite sont plus importants qu'avec n'importe quel autre gaz. Il est en effet difficile de rendre complètement étanche les réservoirs et tuyauteries contenant de l'hydrogène surtout lorsque celui-ci est comprimé à très haute pression. **Même si les industriels arrivent tant bien que mal à maîtriser ce problème, qu'en sera-t-il du consommateur moyen ?**

La question de rendement de l'hydrogène risque d'être problématique : Sur cette question, il est dit plusieurs choses :

- tout dépend du coût de l'électricité utilisé pour le fabriquer. S'il s'agit d'électricité en surplus provenant d'éoliennes et de panneaux solaires dont par définition la production ne peut être adaptée à la demande, il est marginal parce que cette l'électricité sera vendue à zéro euro, voire même à des prix négatifs. S'il s'agit d'électricité nucléaire en faisant fonctionner les centrales à 90% de leur capacité au lieu de 50%, là encore le coût est marginal. L'hydrogène doit donc avant tout être utilisé comme un moyen de stocker de l'électricité quand cela est facile et peu coûteux, quand l'électricité produite n'est pas utilisée ou est perdue.

- a contrario, produire de l'hydrogène à partir d'énergies renouvelables intermittentes, risque de coûter fort cher.

Il est fort peu probable que les entreprises qui envisagent cette solution, s'en tiennent à 20 ou 25 % du temps de travail pour leur activité (d'autant plus que ce serait très irrégulier puisque par exemple, l'éolien ne produit de l'électricité que 23% du temps) et qu'il faut s'attendre à ce qu'elles fassent appel au réseau national pour les trois autres quarts du temps. *IL n'est pas sûr par ailleurs que le process d'électrolyse accepte des variations de tension et de courant (la fameuse variabilité du vent). Il semblerait étonnant qu'un électrolyseur accepte ce genre de variation ou d'arrêts-démarrages incessants.* Ce qui est confirmé par la revue « Transitions et énergies » selon laquelle le fonctionnement des électrolyseurs s'adapte mal à la production intermittente éolienne et solaire. Le rendement des électrolyseurs baisse considérablement. Ce n'est donc pas réaliste.

En revanche, l'utilisation de l'énergie nucléaire, pilotable, pour fabriquer de l'hydrogène, paraît être la seule solution rationnelle.

C'est pourquoi l'option qui sera la plupart du temps retenue, c'est le nucléaire sous-utilisé : des installations d'électrolyse de l'eau sont peu à peu installées à côté des centrales nucléaires aux Etats-Unis et c'est une option retenue en France.

Il reste que l'hydrogène à l'état natif existe dans la nature. L'hydrogène naturel est effectivement produit par la terre : des sources ont été découvertes en différents endroits du globe, en particulier au Mali, près de Bamako, où un forage est tombé sur une poche d'hydrogène pur à 98 %. Cette réserve est aujourd'hui estimée à 1,5 milliards de m<sup>3</sup>. Et elle **semble renouvelable !**

**Autre inconvénient : les risques d'explosion qui ne sont pas négligeables (voir plus haut)**

## Remarques

Bien que la gamme de solutions technologiques de stockage d'énergie électrique soit vaste, seule la filière STEP a atteint une véritable maturité « marché » à ce jour. Les STEP, répétons-le, représentent plus de 99 % de la puissance de stockage d'électricité connectée au réseau installée dans le monde. Mais il est bon de signaler que les STEP existantes ne peuvent satisfaire que 2 % des besoins de stockage pour parer à l'intermittence des EnR dans le monde.

Il convient de rappeler que la présentation succincte ci-dessus des techniques de stockage de l'énergie était faite dans la perspective de l'alimentation du réseau électrique national. Il serait par exemple envisageable, pour pallier le déficit d'énergie électrique intermittente, d'employer de très grosses batteries de grande capacité, de plusieurs mégawatts, jouxtant des éoliennes ou des panneaux photovoltaïques, mais le coût d'investissement en serait

tellement élevé (et renchérirait singulièrement le coût de production lui-même déjà très élevé) que cela n'est pas viable économiquement à l'échelle de notre pays. Cependant, ce serait intéressant pour des endroits isolés, comme dans une île.

De plus les solutions qui pourraient être techniquement au point présentent des difficultés d'ordre technique ou des contraintes environnementales : certaines installations prennent de la place en surface et en hauteur et... pourraient se heurter à une certaine contestation.

## La chaleur renouvelable est stockable

Qu'elle soit produite ou récupérée, l'utilisation de la chaleur est souvent dépendante de la possibilité de la stocker.

Or, précisément l'avantage de la chaleur par rapport à l'électricité est qu'elle peut être stockée et que grâce à cela, elle est utilisable pour de nombreux usages, au point même de permettre la production d'électricité (voir à ce sujet le projet « **Ultra-high temperature thermal energy storage** » qu'une équipe franco-espagnole est en train de mettre au point).

**Les différentes techniques de stockage de la chaleur :**

- **Le stockage thermique sensible le plus connu est bien sûr le ballon d'eau chaude: on stocke depuis des décennies la chaleur sous forme d'eau chaude dans des ballons appelés cumulus (solaires, électriques ou thermodynamiques).** Isolés thermiquement.

- **Le stockage d'eau chaude pressurisée :** l'eau chaude d'un réseau de chaleur est stockée dans un réservoir « pressurisé », c'est-à-dire à une pression supérieure à la pression atmosphérique. Le caractère pressurisé du réservoir permet de stocker l'eau à des températures supérieures à 100 °C. Cela permet d'augmenter la température, donc la densité énergétique du moyen de stockage.

- **Le stockage avec la paraffine :** Il s'agit d'une solution de stockage thermique sous forme de chaleur latente basée sur l'utilisation de paraffine comme Matériau à Changement de Phase (MCP). Lors de la charge, l'énergie thermique est stockée durant la fusion de la paraffine. L'énergie thermique est ensuite récupérée durant la solidification de la paraffine lors de la décharge. Mais les coûts sont relativement importants comparés au stockage d'eau chaude par exemple.

Le stockage de la chaleur revêt un intérêt incontestable : celle-ci est produite en maintes occasions, mais n'est pas forcément récupérée. C'est le cas de la chaleur « fatale » (non utilisée, perdue) produite par les usines, ou différentes installations comme celle des serveurs informatiques ou d'unités de traitement de la biomasse, ou encore de solaire thermique... Cette contribution, comme celle de la chaleur d'origine géothermique, n'est pas très difficile à mettre en œuvre.

Un exemple de chaleur récupérée : à la centrale à concentration (tour d'énergie solaire) près de Ouarzazate au Maroc, les miroirs produisent une grande quantité de chaleur au point que cela permet de produire de l'électricité la nuit (6 à 7 heures).

Une mention particulière **pour le stockage intersaisonnier de chaleur** (ou *STES* pour Seasonal Thermal Energy Storage). C'est le stockage de chaleur ou de froid pour des périodes pouvant aller jusqu'à quelques mois. Un bon exemple est celui de La Communauté solaire de Drake Landing, un éco quartier de 52 habitations individuelles situé dans l'Alberta au Canada grâce au solaire thermique (développé au chapitre « Géothermie ») où la chaleur collectée en été en sous-sol est restituée en hiver pour le chauffage.

De la même manière, une solution analogue est en train de se mettre en place en France avec la société NewHeat qui vient d'inaugurer Narbosol, une centrale solaire thermique consacrée à la fourniture de chaleur renouvelable au réseau de chauffage urbain de Narbonne.

Mieux encore et venant aussi du Canada, selon le même principe, les BTES : **Des sondes géothermiques permettent de stocker la chaleur renouvelable en sous-sol (cette technique est également développée au chapitre « Géothermie »)**

La chaleur renouvelable et bas carbone peut être produite grâce à des panneaux solaires thermiques basse température. Elle est injectée en été dans le sous-sol, dans le BTES et stockée plusieurs mois pour répondre aux besoins énergétiques du bâtiment en hiver : la chaleur est durable dans les sondes, bien plus que dans un ballon d'eau chaude. On peut faire aussi du stockage à court terme.

Cela permet de valoriser les productions saisonnières en les stockant efficacement. Une fois ces sondes financées, c'est extrêmement économique.

Une autre solution de stockage inter-saisonnier est mise en œuvre dans une province d'Autriche qui ambitionne de couvrir la totalité des besoins de chauffage de cette manière. C'est l'utilisation de zéolithes : Les zéolithes sont des minéraux poreux : leur squelette, constitué par un assemblage d'atomes, laisse apparaître des trous disposés régulièrement.

Grâce à leur facilité d'hydratation et de déshydratation et leur stabilité structurale, elles peuvent reproduire indéfiniment le cycle d'adsorption/désorption et constituent des collecteurs efficaces pour le stockage de l'énergie solaire, notamment dans les maisons individuelles.

Le principe est relativement simple : en été, la chaleur issue des capteurs solaires thermiques est stockée par la zéolithe qui se déshydrate et libère l'eau stockée sous forme de vapeur d'eau. Cette condensation permet de récupérer une chaleur qui peut être employée pour l'eau chaude sanitaire. En hiver, c'est le phénomène inverse d'adsorption qui se produit. Les molécules d'eau se fixent sur la zéolithe et ce phénomène physique se traduit par un important dégagement de chaleur qui est restitué à un réseau de chauffage ou d'eau chaude sanitaire.

## Les réseaux de chaleur renouvelable

La chaleur peut être stockée, nous venons de le voir. Encore faut-il qu'elle soit acheminée vers les endroits où on en a besoin. Il existe beaucoup de sources de production de chaleur pour lesquelles il n'existe pas (ou très peu) de système de récupération ni d'acheminement. Pour mémoire, ce sont :

- la filière biomasse (solide et gazeuse) ;
- la filière géothermie directe et/ou assistée par pompes à chaleur ;
- la filière solaire thermique ;
- la filière nucléaire (qui produit beaucoup de chaleur, ordinairement neutralisée par l'eau de la mer ou du cours d'eau voisins) ;
- la filière valorisation énergétique des déchets (critiquable, dans la mesure où l'incinération brûle de nombreux déchets plastiques. Peut-elle donc vraiment être qualifiée de renouvelable ?).

L'acheminement de cette chaleur, à laquelle s'ajoute celle produite par les industries, est, en tout état de cause, organisable, à telle enseigne que l'agglomération de Lille a programmé ce qu'elle appelle « l'autoroute de la chaleur » : il s'agit de 20 kilomètres de canalisations, où l'eau,

transportée à 117 °, permettra de chauffer des logements, des bâtiments administratifs, des piscines...

Les réseaux de chaleur dans le sous-sol peuvent donc atteindre plusieurs kms de long, transportent la chaleur dès 50°C et la distribuent dans les villes.

Mais il existe aussi **des boucles d'eau tempérée** qui récupèrent la chaleur à très basse température (35°C) , provenant de sources diverses (voir au chapitre "géothermie")

Il faut, au sujet de la production de chaleur, savoir que :

- la consommation finale de chaleur constitue en général, près de la moitié des usages énergétiques en France (environ 750 TWh, soit près de 45% de la demande totale d'énergie finale).
- En 2016, Le soutien des pouvoirs publics aux filières de chaleur était de 8 fois inférieur à celui consacré aux EnR électriques.

## La « mobilité » électrique

Pour remplacer les voitures à essence (ou au fuel), on a surtout pour l'instant envisagé le moteur électrique à batterie.

Les batteries, de ce fait, semblent devoir connaître un développement important, malgré leur prix encore très élevé. Pour pallier cet inconvénient, les pouvoirs publics favorisent l'essor de la voiture électrique par des subventions qu'on pourrait qualifier d'exceptionnelles. Le territoire se couvre peu à peu de stations coûteuses de recharge des batteries, subventionnées par le gouvernement et les régions. L'avantage est la diminution du recours aux hydrocarbures dans les villes, afin de diminuer la pollution atmosphérique qui tue (un objectif écologique majeur), mais quid du recyclage des batteries, de l'utilisation des métaux rares de la planète, des émissions électromagnétiques de la batterie en situation de recharge? Ce sont des questions que se posent parfois les constructeurs eux-mêmes.

Comment faire en sorte que le recyclage d'une batterie ne soit pas un désastre écologique ?

A supposer que ces questions soient résolues, combien de centrales électriques supplémentaires faudra-t-il pour fournir en électricité la recharge de ces batteries ?

Autrement dit, comme instrument de lutte contre le changement climatique, le kWh d'EnR chaleur est 30 à 40 fois moins soutenu par l'État que le kWh d'EnR électrique pour lutter contre le changement climatique.

Ce serait dans le domaine du stockage saisonnier de la chaleur qu'il serait nécessaire de porter l'effort à échelle industrielle.

**Au total, la question du stockage de l'énergie électrique se pose encore aujourd'hui de manière aigue. Aucune solution ne s'impose de manière décisive, et toutes s'avèrent coûteuses. Mais les solutions de chaleur renouvelable mériteraient un soutien bien plus important, car elles sont plus fiables, puisqu'elles peuvent se compléter pour tirer profit de leurs avantages respectifs.**

On connaît la réponse : pour un million de voiture, c'est l'équivalent de la production d'une centrale nucléaire. Or, il y a actuellement en France 38 millions de véhicules.

Sans compter un autre problème qui pourrait paraître accessoire : les usagers ne manqueront pas de recharger la batterie de leur véhicule le soir. De ce fait, comment gérer la production d'électricité aux heures de pointe du soir et du début de la nuit ? D'après les calculs du Céréme, « 30 millions de VL électriques se rechargeant en même temps à 19 h, même lentement à 3 kW, appelleraient une puissance supplémentaire de 90 GW, soit presque le double de la demande de pointe actuelle. » Cela risque d'être bien délicat : le risque de black-out s'en trouverait singulièrement renforcé. De plus, l'objectif de maints plans pluriannuels de l'énergie qui consiste à produire moins d'électricité risque fort de ne jamais être atteint.

Cependant, les difficultés principales tiennent à l'accueil qu'en font les consommateurs : pourquoi désireraient-ils acheter un véhicule plus cher

(malgré les aides) dont les fonctionnalités sont inférieures à celui qu'ils possèdent (temps de recharge des batteries, entre autres)? En cause, le coût de la batterie qui constitue 40 % de la valeur d'un véhicule, ce qui ne s'améliorera pas rapidement. Il est par ailleurs assez dur de s'imaginer le regard vissé sur la jauge de niveau de charge de la batterie (car en effet l'autonomie proposée actuellement est faible, sans compter que la recharge n'est pas simple, les systèmes n'étant pas tous identiques). Les véhicules électriques sont sensiblement moins fiables que les thermiques et cela restera vrai un bon bout de temps. Et pourtant, c'est la solution que les gouvernements entendent imposer.

Ce que nous en dit Reporterre (2021) n'est pas encourageant : *« Un point fait consensus : produire un véhicule électrique demande beaucoup plus d'énergie, et émet deux fois plus de gaz à effet de serre que de produire un véhicule thermique, du fait de la production de sa batterie et de sa motorisation... »*

*Les experts du cabinet de conseil écolo Carbone 4 défendent le véhicule électrique, considérant qu'une électrique de petite taille est moins émettrice de CO<sub>2</sub> à partir de 30.000 ou 40.000 kilomètres parcourus — ayant dès lors « compensé » sa fabrication...(sous réserve) d'« une production de batteries n'utilisant aucune électricité d'origine fossile, ce qui n'est pas encore la norme, mais pourrait le devenir dans un futur proche. »...*

*Tout se passe donc comme si le pacte implicite de la voiture électrique était le suivant : pour espérer une réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, qui repose elle-même sur une série d'hypothèses fragiles — petites voitures, allongement de la durée de vie des batteries, généralisation des énergies renouvelables —, ainsi qu'une réduction de la pollution et du bruit dans les villes, il faut générer d'autres pollutions, ailleurs. Pour Alma Dufour, des Amis de la Terre, cela pose un sérieux problème de justice sociale : « La question de l'accès à l'eau dans les régions du monde qui subissent de plein fouet le changement climatique est aussi importante que les émissions de CO<sub>2</sub>. »*

Il s'ajoute donc de sérieuses raisons écologiques : un véhicule électrique produit pour sa fabrication deux fois plus de CO<sub>2</sub> qu'un véhicule thermique (par la suite, en roulant, il devient plus écologique et « rattrape » le véhicule thermique après un kilométrage allant de 15 000 à plus de 300 000 km en fonction de l'origine de l'électricité, verte ou

autre (en France, c'est 50 000 km). Mais surtout, la fabrication de batteries requiert des métaux rares dont les conditions d'extraction sont souvent désastreuses. Pour ne citer qu'un exemple, le cobalt vient surtout de la République Démocratique du Congo où 40 000 enfants seraient employés pour son extraction.

Ce que nous en dit Reporterre n'est pas pour nous rassurer :

Cette question, d'ailleurs, est préoccupante : car que ce soit pour les téléphones portables, l'éolien, les voitures électriques ou les véhicules à hydrogène, il faut beaucoup de minerais. Cobalt, graphite, lithium, cuivre ou nickel..... leur extraction croissante peut *« engendrer des atteintes à l'environnement et aux droits humains »*, alerte l'ONG Sherpa dans un rapport paru jeudi 29 octobre : travail forcé des enfants, pollution des eaux par des produits toxiques, destruction d'espèces protégées. La liste est longue et noircit le tableau d'une transition écologique verte et propre.

*« La transition énergétique fait augmenter de manière significative la demande en minerais »,* confirme Jean François, juriste au sein de l'ONG Sherpa. Ainsi, l'éolien nécessite de l'aluminium, du chrome, du cuivre, du fer, du plomb, du zinc, du manganèse, du nickel, du molybdène et du néodyme. Pas moins de onze minerais sont également nécessaires pour fabriquer des batteries électriques. Et notre gourmandise minérale n'est pas prête de s'atténuer : pour les batteries des véhicules électriques et le stockage de l'énergie, l'Union européenne aurait besoin, en 2050, de près de soixante fois plus de lithium et de quinze fois plus de cobalt. Selon la Banque mondiale, dans un scénario de limitation du réchauffement à 2°C par rapport à l'ère préindustrielle, la demande en graphite – qui entre dans la composition de certaines batteries – pourrait augmenter de plus de 400 %.

*Reporterre 29 octobre 2020*

Cette gloutonnerie qui vient des milieux d'affaires est dommageable : nous sommes dans une transition basée sur la technologie et la consommation de ressources, alors qu'il faudrait la fonder sur la sobriété.



« Dans ces régions parmi les plus arides au monde, les mines de lithium évaporent à grande allure les rares ressources en eau. Sur le site d'Atacama, au Chili, les miniers prélèvent près de 200 millions de litres par jour. Le pompage de la saumure du sous-sol riche en lithium crée un vide qui fait migrer vers les profondeurs l'eau douce disponible. Cette double perte d'eau abaisse le niveau de la nappe phréatique, assèche le sol et la végétation au détriment des animaux, des cultures et des gens », expliquent les Qollas (ethnie locale, NDLR).

À quoi s'ajoutent les traitements au chlore et la dispersion dans les eaux des déchets de pompage mêlés à des solvants, qui détruisent des micro-organismes dont on ne sait pas grand-chose, sinon qu'ils sont les organismes vivants les plus anciens de la planète.

## La mobilité « hydrogène »

Cette solution mérite qu'on s'y attarde quelque peu, car les appréciations sur l'avenir de cette filière sont très divergentes. Des experts lui attribuent souvent un grand avenir. D'autres spécialistes restent très sceptiques. Alors qu'aujourd'hui existent déjà des flottes dites « captives » de taxis ou de voitures de services, et que des trains en Allemagne roulent à l'hydrogène, cette solution semble bien être l'une des plus écologiques, puisque le seul déchet que rejette un véhicule à hydrogène est de l'eau.

La première complication, nous l'avons vu plus haut, c'est que ce gaz est explosif et que les installations de stockage-recharge des véhicules (de type Seveso) sont très coûteuses (il faut compter plusieurs centaines de milliers d'euros, voire un million ou plus, selon la taille) et encore bien plus pour les unités de stockage industrielles. Il y a aussi, pour les voitures, des problèmes techniques dont les solutions restent aujourd'hui très coûteuses, entre autres le réservoir, car l'hydrogène se diffuse aisément au travers de beaucoup de matériaux usuels, à quoi s'ajoute le poids du véhicule.

Deuxième problématique, l'hydrogène commercialisé aujourd'hui est produit à 95 % en émettant des gaz à effet de serre (par vaporeformage de gaz méthane) et rejette dans l'atmosphère 11 kilos de CO<sub>2</sub> pour 1 kilo d'hydrogène produit. La solution propre, l'hydrogène vert, coûte actuellement trois à quatre fois plus cher que la méthode « sale ».

Or toutes les mines actuellement en production annoncent un doublement ou un triplement de leurs activités pour se positionner sur le marché du lithium, dont la demande pourrait croître de 18 % par an d'ici à 2025. (Reporterre 2021)

Pour des questions d'échelles, de coût de fabrication, d'utilisation intensive de matières premières, les batteries ne sont pas à la hauteur des enjeux. Pour donner un ordre d'idée, la production annuelle mondiale de lithium ne permettrait même pas de fabriquer le nombre de batteries nécessaire pour stocker une semaine de consommation d'électricité française. Et il faut retirer 50 kilos de matériaux du sol pour fabriquer un kilo de batterie ! La copie est à revoir, semble-t-il.

A supposer qu'on passe à la phase (coûteuse) d'industrialisation du stockage de masse qui permettrait d'abaisser ensuite un peu les coûts, il reste qu'en aval, les véhicules utilisant la pile à combustible nécessitent des stations de recharge onéreuses et sont eux-mêmes très chers malgré un effort très important en recherche et développement.

Autre inconvénient : pour transporter l'hydrogène, il faut le comprimer, sinon, avec une voiture, à pression atmosphérique, pour faire 400 km, il faudrait un réservoir de 44 m<sup>3</sup> !

Ensuite, une fois comprimé, il faut le transporter et là, nouveau problème ! La perméation de l'acier à 700 bars est importante, ce qui sous-entend qu'on ne peut stocker que peu de temps sous peine de perte. Et donc si pour la mobilité, on peut le faire, pour des usages industriels, il faudra soit passer par une méthanation, soit construire localement une unité H<sub>2</sub>.

Tout cela explique qu'après avoir commencé à investir dans les véhicules à hydrogène, certains constructeurs semblent avoir changé leur fusil d'épaule au printemps de 2019 : le PDG de Volkswagen, l'Autrichien Herbert Diess, a affirmé lors de la conférence de presse annuelle du groupe, le 12 mars 2019 :

« Il n'y a pas d'alternative à la voiture à batterie pour les décennies qui viennent... L'hydrogène est moins efficient ». BMW, Daimler et Volkswagen se sont mis d'accord, le 21 mars de cette même année pour « faire la transition vers la mobilité verte » en mettant l'accent sur les voitures à batterie et hybrides et non pas sur les véhicules à pile à combustible, « qui ne seront pas prêts avant de nombreuses années ». (Source : magazine Reporterre, avril 2019).

Le chemin risque d'être long et ardu. Les solutions hydrogène risquent fort de ne se développer que lentement. Elles sont en quelque sorte mises de côté au profit de la mobilité (à batterie) électrique. Celle-ci n'est pas forcément la meilleure solution, car la fabrication de batteries est, comme nous l'avons vu plus haut, tellement émettrice de CO<sub>2</sub> qu'il faut avoir roulé entre 35 000 et 300 000 (selon que dans le pays d'utilisation, l'électricité aura été produite de manière « propre » ou non) pour polluer moins qu'avec une voiture thermique. Mais apparemment, à l'exception de quelques constructeurs, c'est ce qui va se passer puisqu'en Europe, est maintenant programmée la construction de nombreuses usines de fabrication de batteries (opération appelée « Airbus des batteries »).

Cependant, après la crise du Covid-19, il semble bien que l'Allemagne soit décidée à soutenir un effort significatif pour le développement de l'hydrogène, et que la France soit décidée à lui emboîter le pas.

## Conclusion sur la mobilité

La solution du stockage de l'énergie par batterie connaît beaucoup moins de progrès que ne l'espéraient les chercheurs. La batterie la plus efficace actuellement, celle au lithium, se heurte à un inconvénient majeur : les ressources mondiales pourraient être suffisantes si suffisamment de mines étaient ouvertes, ce qui n'est pas le cas. Or le délai entre la décision d'en ouvrir une et le début de l'exploitation est élevé : pas loin de 10 ans, ce d'autant plus que les populations n'acceptent pas facilement ce type d'activité qui est susceptible de modifier sensiblement le milieu naturel, voire de le détériorer.

Le gouvernement français a détaillé son plan de sept milliards d'euros sur dix ans pour développer à grande échelle l'hydrogène, qui peut servir à rendre plus « propres » certaines activités.

Deux milliards d'euros en 2021-2022 pour décarboner les usages industriels, alors que de nombreux secteurs utilisent aujourd'hui un hydrogène d'origine fossile (**hydrogène gris**), produit avec des procédés fortement émetteurs de gaz à effet de serre.

**L'hydrogène peut devenir « propre » en étant notamment produit par électrolyse de l'eau, à condition d'utiliser une électricité issue de sources faiblement carbonées fiables et constantes. L'objectif est d'installer 6,5 gigawatts d'électrolyseurs en 2030.**

### Les mobilités « lourdes » visées

Il est question également de développer une offre de mobilités « lourdes », c'est-à-dire pour des camions, des trains en zone non-électrifiée, voire l'avion (le souhait, en 2035 avoir un avion neutre en carbone utilisant l'hydrogène). Au total le gouvernement vise six millions de tonnes de CO<sub>2</sub> économisées en 2030 (il faut rappeler qu'en 2019, la France a émis au total 441 millions de t de CO<sub>2</sub>).

Le dernier volet du plan porte sur la recherche, l'innovation et le développement des compétences.

(cf. la résistance opposée par la population de la commune de Montalegre, au nord-est du Portugal, tout près de la frontière espagnole). De même, un projet en Serbie rencontre une très forte opposition.

Anecdotiquement, il suffirait de quelques dizaines d'installations géothermiques profondes, en particulier en Alsace, pour récupérer chaque année dans la roche extraite suffisamment de lithium pour les besoins nationaux. Ainsi on ferait d'une pierre deux coups.

Les recherches pour d'autres types de batteries tardent à donner des résultats. Peut-on en espérer avant 2030 ?

Pour cette raison, la mobilité électrique nous semble ne pas devoir connaître l'essor rapide annoncé par les milieux officiels.

Les véhicules à hydrogène nécessitent eux aussi des métaux dont les réserves sont peu abondantes comme le magnésium (il en faudrait 70 kg pour chaque réservoir) et d'autres encore, ce qui engendrerait, à plus grande échelle des tensions sur la production des métaux rares.

**Que dit le think-tank Céréme sur le développement de la mobilité électrique et/ou à hydrogène ?**

### **Le véhicule électrique**

Il est adapté aux trajets courts. De ce fait, beaucoup de ménages périurbains ou ruraux auront besoin de deux véhicules : l'un 100% électrique pour les trajets locaux, l'autre, hybride par exemple, pour les trajets de longue distance (vacances notamment). Cependant, tous les ménages ont-ils les moyens de s'offrir deux véhicules ?

### **La pile à combustible alliée au vecteur hydrogène :**

Cette solution est convenable au point de vue des émissions de CO<sub>2</sub>, puisqu'elle émet seulement de la vapeur d'eau. En outre, une pile à combustible comporte moins de composants critiques que les batteries. Mais la production d'hydrogène et la distribution en stations-service sont très coûteuses. Le choix, coûteux, fait par les gouvernements, de la solution « à batterie » interdit pratiquement le développement de cette deuxième solution et la cantonne à des solutions de « niche » qui ne sont pas sans intérêt :

- des flottes publiques ou privées à déploiement local, s'appuyant sur une production locale d'hydrogène.
- pour les poids lourds : sur de grands axes autoroutiers munis de stations-services disposant d'installations sécurisées.
- pour le ferroviaire : le réseau TER une fois muni des installations sécurisées nécessaires.

### **Les véhicules hybrides, éventuellement rechargeables :**

Dans cette solution hybride thermique-électrique, le moteur thermique fonctionne avec un minimum de carburant.

**Il apparaît ainsi comme la solution de masse la plus rationnelle, le meilleur compromis** en ce qu'il consomme peu de carburant et que de plus, ce carburant aujourd'hui d'origine fossile peut par la suite être remplacé par des carburants d'origine décarbonée.

Nous pourrions ajouter qu'un véhicule rechargeable peut fonctionner presque exclusivement à l'électricité pendant la semaine et ne fonctionner avec du carburant que le week-end...

Cependant les constructeurs, soumis à la pression médiatique et soucieux de leur image verte, ébranlés par les décisions de l'UE - relayées par des gouvernements suiveurs - visant à ne plus vendre le moindre véhicule thermique neuf à partir de 2035, laissent entendre qu'ils sont prêts à abandonner également la solution de l'hybride rechargeable au profit du 100% électrique.

**La solution « véhicules hybrides, éventuellement rechargeables » devrait faire partie, au regard des usages et de la protection de l'environnement, du bouquet des solutions les plus soutenables. Pourtant, les décisions de l'UE ne lui laissent pas d'avenir significatif.**

Un tel bouquet non seulement ne nécessiterait pas la construction de réseaux démesurés, mais éviterait de dévaster les zones de la planète productrices de métaux rares, en particulier cobalt et lithium avec tous les risques pour la ressource en eau et pour la protection de la biodiversité qui y sont localement associés.

Les moteurs électriques à batteries ou à hydrogène seront petit à petit mis en place dans la difficulté, étant tributaires de progrès technologiques dont les avancées dans le temps sont difficilement prévisibles. Pour résumer ce long passage sur le stockage de l'énergie, le stockage de l'électricité à très grande échelle est techniquement possible, mais sans modèle économique viable en vue...

Il y aurait donc pour l'instant, et de nombreuses années encore, une seule solution véritable, mais qui ne résoudrait pas tout : la production de chaleur (renouvelable), et son stockage, qui ne posent pas trop de problèmes et qu'il conviendrait de développer bien davantage.

## Conclusion sur les énergies renouvelables intermittentes

*On l'aura compris : les énergies renouvelables les plus connues, les plus fréquemment évoquées, comportent un inconvénient majeur : l'intermittence. Inconvénient auquel il est particulièrement difficile de remédier, en l'absence de solutions de stockage viables à l'échelle d'une nation.*

Les pays qui, comme l'Allemagne, la Belgique, l'Espagne... et aux USA, la Californie, ont décidé d'abandonner le nucléaire et de faire le pari du renouvelable (qui produit environ un tiers de l'électricité via d'immenses champs de panneaux solaires et d'éoliennes), ont des systèmes énergétiques qui sont à la peine. Pendant les périodes de canicule, en Californie, par exemple, en raison de la faiblesse des vents et des performances réduites des panneaux photovoltaïques, la production d'électricité baisse sensiblement, alors que la consommation augmente avec l'usage massif des climatiseurs. Les opérateurs sont alors obligés de procéder à des coupures de courant d'urgence pour éviter un effondrement du réseau, et cela sans prévenir les consommateurs. Les systèmes électriques en question ne tiennent aujourd'hui que grâce aux centrales à gaz, une source mobilisable à la demande.

Dans un certain nombre de pays, a contrario, durant le confinement, la consommation d'électricité a baissé de 20% et parfois plus. Cela a entraîné des conséquences inattendues : en France, par exemple, en mai 2020, le réseau national électrique a demandé à de nombreux producteurs de couper en urgence l'alimentation provenant de centrales éoliennes et solaires qui présentait *«un risque significatif de disruption de la sécurité de l'approvisionnement»*.

On peut donc remarquer que la surabondance d'électricité renouvelable, tout comme sa pénurie, risque de provoquer un blackout et un effondrement de tout le système électrique d'un pays.

Sur ces sources d'énergie, notre conclusion, nous l'emprunterons au livre « Ecologie sans transition » publié aux éditions Divergences par le groupe Désobéissance écolo Paris, dont voici un extrait :

*« Les énergies renouvelables ont le fâcheux défaut de dépendre des cycles et des contraintes naturelles : on les dit intermittentes. Contrairement aux énergies fossiles, elles ne conviennent pas à une économie en croissance dont les flux doivent être stables.*

*En outre, pour que les dispositifs de captation d'énergie renouvelable soient rentables et pour qu'ils puissent être pilotés informatiquement, il faut extraire et utiliser des métaux rares. Or l'industrie minière provoque des pollutions et inflige des conditions de vie et de travail intolérables aux populations qui ont le malheur d'avoir ces minerais sous leurs pieds. Enfin, **quand des éoliennes, des panneaux solaires ou des centrales à biomasse sont installés à une échelle industrielle, c'est toujours, de manière absolument anti-écologique, au mépris des habitant-es et des paysages qui subissent leurs nuisances, et du contrôle démocratique que l'on devrait exercer sur la production et la distribution de l'énergie. De sorte que, pour l'instant, ce qui est « renouvelable », c'est surtout l'exploitation des humains et des milieux vivants.** »*

Dans le même ordre d'idées, on pourrait ajouter le commentaire fait par Jean-Paul Oury sur le film récent produit par Michael Moore :

*« Les énergies dites renouvelables (solaire, éolien et biomasse) sont sans doute la plus grosse escroquerie de tous les temps et ceux qui en ont fait l'apologie sont, soit des pigeons qui se sont fait bernier (les militants écologistes), soit de cyniques entrepreneurs qui ont profité de la situation et de la naïveté de certains militants de bonne foi pour s'enrichir. Ce dernier point est d'ailleurs la conclusion de ce film : toute cette entreprise de transition énergétique n'est qu'une vaste fumisterie menée tambour battant par des entreprises dont la plupart ont des intérêts dans l'utilisation d'énergies fossiles. Aussi, comme le montre Gibbs à plusieurs reprises, il semble totalement impossible de se passer des énergies fossiles (qui représentent 85 % de la demande d'énergie) quand on a recours aux énergies renouvelables. »*

**Fort heureusement, d'autres sources d'énergie renouvelables existent qui sont souvent peu connues ... excepté l'hydroélectricité qui est très exploitée : ce sont des sources d'énergie pilotables, réglables et pérennes.**

# 3ème partie

## Les énergies renouvelables pilotables

### Chapitre 1

### L'énergie hydroélectrique

L'hydroélectricité est perçue favorablement dans l'opinion qui se souvient peu des impacts sociaux et environnementaux du passé.

**L'énergie hydroélectrique**, ou hydroélectricité, est une énergie renouvelable qui est issue de la conversion de l'énergie hydraulique en électricité. L'énergie cinétique du courant d'eau, naturel ou généré par la différence de niveau, est transformée en énergie mécanique par une turbine hydraulique, puis en énergie électrique (énergie finale) par une génératrice électrique synchrone.

En 2017, l'énergie hydroélectrique représentait 16,6 % de la production mondiale d'électricité ; elle possède de nombreux atouts : Cette énergie renouvelable, d'un faible coût d'exploitation est responsable de la plus faible émission de gaz à effet de serre de toutes les EnR ; la capacité de stockage de ses réservoirs permet de compenser les variations de la demande ainsi que celles des énergies intermittentes.

Les installations hydroélectriques ne sont pas destinées à la seule production d'énergie mais permettent d'autres usages, tels que l'alimentation en eau potable, l'irrigation des terres agricoles ou la navigation marchande ou récréative.

Elles présentent toutefois des impacts sociaux et environnementaux à la construction : déplacement de population, éventuellement inondation de terres agricoles, modifications des écosystèmes aquatiques et terrestre, blocage des alluvions, etc. Et si les risques d'accidents sont minimes, ils peuvent être très dangereux. D'autres inconvénients peuvent être les conflits d'usages entre l'hydroélectricité et le tourisme nautique, ou la perte des possibilités d'irrigation en aval des barrages ...

Centrale du Grand Orb





### Ses formes de production principales :

- Les **centrales dites gravitaires**, ainsi nommées car les apports d'eau dans leur réservoir ou leur prise d'eau sont essentiellement issus de cours d'eau par gravitation, telles que les centrales au fil de l'eau ou les centrales hydroélectriques de lac ;

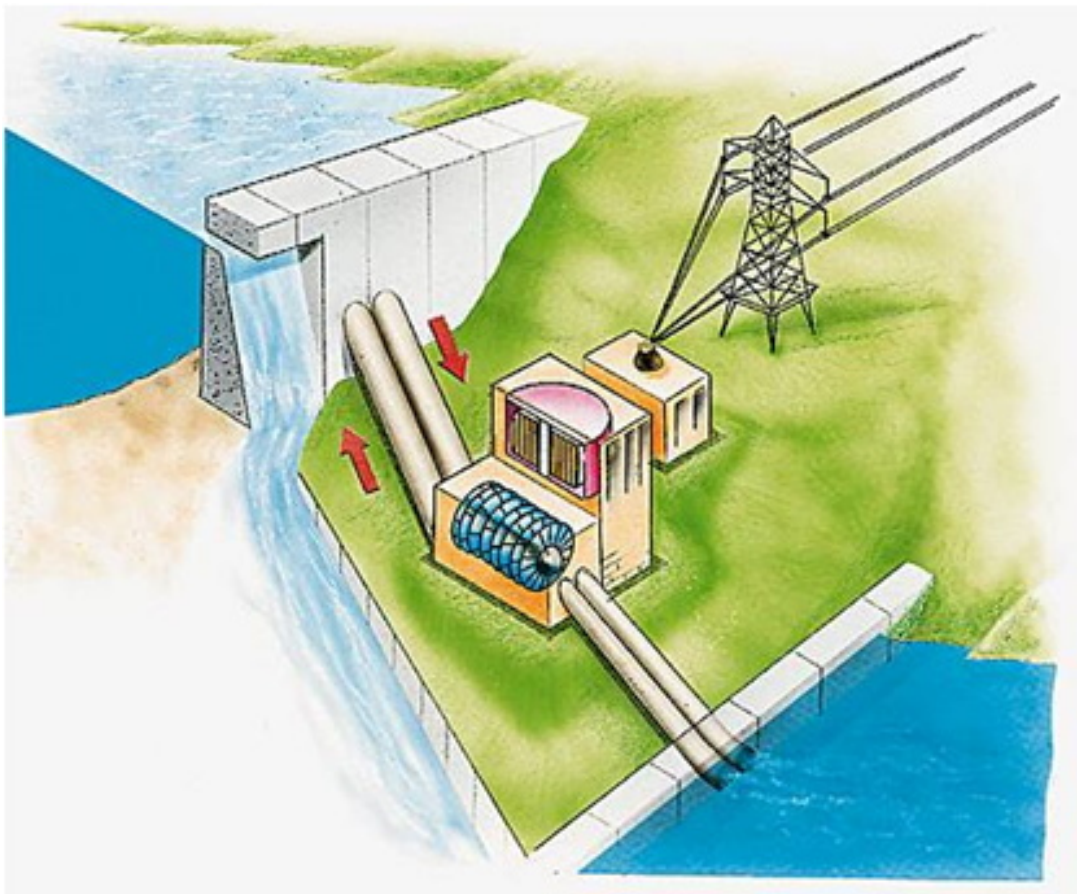
- Les **stations de transfert d'énergie par pompage** (S-T-E-P), aussi connues sous l'appellation « centrales hydrauliques à réserve pompée » ou « centrale de pompage-turbinage », dans lesquelles des turbines réversibles pompent l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur (pompage durant le creux de la demande à partir d'électricité produite par des équipements de base)... (NDLR : ce qui a pour avantage de rendre à nouveau l'eau disponible pour la production d'électricité). Le pompage-turbinage peut aussi se faire dans des conduites séparées.

- Les **usines marémotrices**, qui utilisent l'énergie du mouvement des mers, qu'il s'agisse du flux alterné des marées (marémotrice au sens strict), des courants marins permanents (hydroliennes au sens strict) ou du mouvement des vagues.

La **proportion d'énergie hydroélectrique produite** est moindre que celle de la puissance installée (voir ci-dessous).

Elle représente 16 % de la production électrique mondiale en 2015 (contre 20,9 % en 1973). Précisons aussi que pour la France, la production hydroélectrique atteint 63,8 TWh en 2012 (<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroelectricite> - notes, soit 11,8% de la production totale d'électricité. En fin 2012, la puissance installée était de 25,4 GW, ce qui représente 20% des capacités électriques françaises.

La France s'est donné pour objectif (dans le cadre du Grenelle Environnement), d'accroître la production de 5 TWh d'ici à 2020 et d'augmenter les moyens de pointe de 3 000 MW.





## Objectifs quantitatifs et orientations fixés par la PPE (Programmation Pluriannuelle de l'Énergie)

- **Augmenter** la capacité de production hydroélectrique de **500 à 750 MW** et la production de **2 à 3 TWh d'ici 2023**.
- **Préserver** la capacité de **flexibilité** de l'hydroélectricité, essentielle pour contribuer à la flexibilité du système électrique et faciliter l'intégration de capacités accrues d'énergies renouvelables.
- Évaluer les pertes de production liées aux actions de rétablissement de la continuité écologique et optimiser autant que possible la **conciliation des enjeux de préservation des milieux** et de production d'énergie renouvelable.
- Relancer le développement de l'hydroélectricité par des **appels d'offres** réguliers et par l'**optimisation** des concessions existantes.
- Engager d'ici 2023 des **projets de stockage sous forme de STEP**, en vue d'un développement de **1 à 2 GW** de capacités entre 2025 et 2030. (*Actuellement, en France, 5 GW existants*)

Ajoutons qu'en France, la production hydroélectrique représente 70% de la production d'électricité à partir de sources renouvelables.

La production est inférieure aux capacités, parce qu'elle est chargée d'assurer l'équilibre instantané entre la production et la consommation d'électricité et la substitution aux renouvelables quand il n'y a pas de vent et/ou de soleil. En effet, l'énergie hydroélectrique est, grâce à sa souplesse (mobilisable en quelques minutes), une variable d'ajustement indispensable, l'énergie du réseau électrique français ne pouvant pas se stocker, en l'état actuel des choses. Les équipements de pointe dont il est question un peu plus haut sont des centrales de forte puissance, très équipées sur le plan technologique, à même d'intervenir à la seconde près en cas de souci sur le réseau de distribution, pour éviter les black-out, en particulier le soir aux alentours de 19 H.

**Tout cela est très fiable** : Malgré des coûts de mise en œuvre généralement élevés, les coûts de maintenance sont raisonnables, les installations sont prévues pour durer très longtemps. Il n'y a pas de coût de combustible et l'énergie de l'eau est renouvelable si elle est bien gérée.

L'hydroélectricité peut poser néanmoins des **problèmes** : par exemple, ceux **liés au climat** peuvent avoir des répercussions importantes, à savoir la baisse répétée, ces dernières années, de la production due à un manque de précipitations, à une évaporation plus importante et à un assèchement consécutif de ses réservoirs. Le bilan mensuel du gestionnaire du réseau à haute tension (RTE), publié le 11 juin 2018, met en évidence le printemps particulièrement sec que la France a connu, celui de 2017.

Entre avril et juin 2017, la sécheresse a fait considérablement chuter la production d'énergie hydroélectrique, et a vu le niveau des réservoirs baisser de manière significative : une baisse de 35,5% au mois d'avril, et de 28,7% au mois de juin de cette année par rapport aux mêmes mois en 2016.

La baisse des précipitations n'a cependant pas été spectaculaire, mais on note depuis quelque temps un effet cumulatif : la période de chaleur s'accompagne d'une augmentation de la consommation d'eau, et part d'un niveau des lacs déjà plus bas, donc avec des stocks d'eau inférieur à la moyenne historique.

C'est un phénomène qui touche beaucoup de pays, et pas seulement l'Europe.

### Impact social et environnemental

Les impacts environnementaux varient avec le type et la taille de la structure mise en place : ils sont faibles s'il s'agit d'exploiter les chutes d'eau naturelles, les courants marins, les vagues, mais ils deviennent très importants s'il s'agit de créer des barrages et des retenues d'eau artificielles.

Dans ce cas, on est obligé de déplacer des populations et d'abandonner des terres agricoles souvent fertiles, les rivières et les fleuves étant des lieux privilégiés pour y vivre et implanter des habitations. Par exemple, le barrage des Trois Gorges en Chine a entraîné le déplacement de près de deux millions de personnes. Bien sûr, en France, le nombre de personnes touchées a été bien moindre, mais cela explique la difficulté à mettre en place de nouveaux barrages-lacs et la tendance à développer les centrales au fil de

l'eau. De fait, il est pratiquement impossible dans notre pays de programmer de nouveaux barrages-lacs.

De même, la faune, et pas seulement aquatique, est perturbée (bien que des dispositifs comme les passes à poissons soient installés), ainsi que tout l'écosystème environnant.

Les installations hydroélectriques ne sont pas destinées à la seule production d'énergie mais permettent d'autres usages, tels que l'alimentation en eau potable, l'irrigation des terres agricoles ou la navigation marchande ou récréative.

## **L'hydroélectricité « au fil de l'eau »**

Les installations de ce type sont implantées sur le cours de grands fleuves ou de grandes rivières. Elles sont caractérisées par un débit très fort et un dénivelé faible avec une chute de moins de 30 m. Dans ce cas, il n'y a pas de retenue d'eau et l'électricité est produite en temps réel. (elle n'est pas stockée comme dans le cas précédent).

De ce fait, il n'y a pas de possibilité de la stocker durant les périodes de l'année de hauts débits pour pouvoir déstocker en période de basses eaux.

Cette production varie fortement en fonction des événements climatiques (pluies, sécheresses, saisons, etc.). Elle fait partie, comme les éoliennes et le solaire, des énergies renouvelables à production dite « fatale » au sens où elle doit être consommée instantanément au moment de sa production, en l'absence de capacité de stockage.

## **La petite hydroélectricité**

En France, la petite hydroélectricité (qui peut venir tout aussi bien de centrales à retenue que de centrales au fil de l'eau) produit déjà 7,5 TWh / an, soit 10% de la production d'hydroélectricité nationale fournie par 2200 centrales de petite puissance (inférieure à 10 MW). Les petites centrales hydroélectriques ont un fort potentiel. : des milliers de sites ne sont pas exploités faute de technologies qui permettent d'optimiser l'investissement pour obtenir un coût installé raisonnable.

Les centrales d'une puissance supérieure à 4,5 MW appartiennent à l'Etat qui en confie l'exploitation à un opérateur, sous le régime de la concession.

Ceci dit, la plupart des barrages ont été construits il y a plusieurs dizaines d'années et une nouvelle biodiversité a reconquis les lieux, qui sont parfois devenus source de développement économique et lieux d'attraction touristique (ex Lac du Salagou dans l'Hérault).

En contrepartie, elle ne nécessite que des aménagements simples et beaucoup moins coûteux que les centrales de plus forte puissance.

On définit généralement les centrales dites « au fil de l'eau » comme étant celles dont la constante de vidage (temps théorique nécessaire pour écouler la réserve d'eau en turbinant au maximum) est inférieure à 2 heures.

Leur production est maximale durant la période de fonte des neiges, c'est-à-dire au printemps, mais elle connaît également des pointes transitoires pendant et après les périodes de fortes pluies voire d'orage dans les vallées de montagne.

Pour les petits producteurs (propriétaires privés), exploiter de nouveaux sites de petite hydraulique ou « microcentrale » (moins de 4,5 MW) nécessite une autorisation (ou un « droit d'eau »), qui ne peut pas être accordée si les installations constituent un frein à la continuité écologique (ex : protection des poissons migrateurs). D'autres dispositions qui s'ajoutent divisent de fait par trois le potentiel hydroélectrique des sites vierges pouvant faire l'objet de nouvelles installations.

En effet, même pour dériver et aménager un cours d'eau non classé, un particulier devra déposer un dossier assez complexe en préfecture qui servira pour la consultation des autorités compétentes (DDAF, DDE, DRIRE, DREAL) et des parties concernées (pêcheurs, riverains, etc.). La procédure est lourde et longue (au moins un à deux ans).

La mise en valeur de cette énergie est donc freinée par des contraintes économiques, administratives et environnementales.

### La réglementation

Parmi les installations hydroélectriques, 400 relèvent du régime de la concession et 2 100 de celui de l'autorisation, selon que leur puissance excède ou non 4,5 mégawatts (MW).

Elles doivent nécessairement s'articuler avec les règles complexes relatives à la restauration de la continuité écologique des cours d'eau : en effet, depuis la loi dite « LEMA » du 30 décembre 2006, prise en application d'une directive européenne visant à préserver la qualité de l'eau, les cours d'eau peuvent faire l'objet d'un classement en deux catégories par l'autorité administrative :

- sur les cours d'eau de catégorie 1, qui sont caractérisés par un très bon état écologique ou identifiés comme des réservoirs biologiques, il est interdit d'accorder toute nouvelle autorisation ou concession d'ouvrage constituant « *un obstacle à la continuité écologique* » ;

- sur les cours d'eau de catégorie 2, sur lesquels il est nécessaire d'assurer le transport des sédiments ou la circulation des poissons, la gestion, l'entretien et l'équipement d'ouvrages sont subordonnés à des règles définies par l'autorité administrative.

### Conclusion

Même si les quelques accidents qu'il y a eu (destruction des barrages) ont été plus mortels que tous les accidents nucléaires au monde, on peut dire que l'énergie hydroélectrique est de loin notre meilleur atout en matière d'énergie renouvelable électrique, cependant les potentialités sont minces en France, où les meilleurs sites ont déjà été occupés.

Les coûts, comme la réglementation, peuvent réduire considérablement son potentiel de développement. Par exemple, à elle seule, une « *passerelle à poissons* » représente un coût d'investissement total de 2 à 5 millions d'euros pour une centrale d'1 MW.

### L'énergie osmotique

Les centrales osmotiques fonctionnent sur la différence de salinité entre l'eau douce et l'eau salée. C'est pourquoi elles doivent se placer dans des lieux où l'eau salée et l'eau douce se rencontrent naturellement, c'est-à-dire aux embouchures des fleuves. La méthode consiste à utiliser une pression créée par la migration de molécules d'eau à travers une membrane :

Les molécules d'eau d'un réservoir d'eau pure sont attirées vers un réservoir d'eau concentrée en sel. Cela a pour effet d'augmenter le volume d'eau contenu dans le réservoir d'eau salée, et d'augmenter la salinité du réservoir d'eau pure. Cette réaction se nomme l'osmose et se déroule ainsi jusqu'à ce qu'un équilibre de salinité soit atteint entre les deux réservoirs.

Ces échanges de molécules d'eau créent une pression exploitable pour produire de l'électricité.

Une première usine expérimentale est en cours d'installation dans le delta du Rhône à Port-Saint-Louis. Les perspectives de cette filière sont intéressantes, mais il faudra beaucoup de temps pour la mettre en place à l'échelle industrielle.

# Chapitre 2

## La géothermie

### Qu'est-ce que la géothermie ?

La géothermie est une source d'énergie renouvelable capable de fournir du froid, de la chaleur et de produire de l'électricité. Elle permet d'exploiter les calories contenues dans le sol et le sous-sol, à plus ou moins grande profondeur.

Elle est inégalement répandue en France, et peu connue. Pour cette raison, elle mérite un traitement particulier.

Il s'agit de récupérer la chaleur ou les thermies du sol ou du sous-sol afin de l'utiliser à des fins diverses, l'électricité, mais surtout le chauffage, ainsi que l'eau chaude sanitaire et même le rafraîchissement, en été. Le lecteur sait sans doute que la température du sous-sol s'élève en fonction de la profondeur : en moyenne : + 3,3°C tous les – 100 m en France. C'est ce qu'on appelle le gradient géothermique. Cette chaleur est utilisable et a déjà été bien utilisée.

### 1 - La géothermie profonde

On appelle géothermie profonde celle qui consiste à chercher la chaleur du sous-sol à des profondeurs variant de plus de 200m à plusieurs kms. Comme on peut la récupérer directement à haute température, voire très haute température, elle peut produire de l'électricité (2 centrales en France produisant 102 GWh par an), ou, directement, de la chaleur pour des gros réseaux de chaleur (pour plusieurs centaines, voire plusieurs milliers d'immeubles d'un quartier ou d'une ville. Il existe une soixantaine d'installations de ce type en France produisant 1650 GWh/an (voir ci-dessous), ainsi que d'autres à usage industriel ou agricole ou de loisirs (130 GWh/an).

#### La géothermie de grande profondeur

La technologie EGS (« Enhanced Geothermic System) mise au point à Soultz-les-Forêts, lieu d'expérimentation, d'études et de prospection, consiste à libérer les failles de leur dépôts minéraux à 1600 m environ de profondeur, pour

C'est la seule forme d'énergie renouvelable pouvant assurer une production régulière 24h/24 et qui soit disponible à tout moment sans restriction. Son coût de fonctionnement peut concurrencer celui du gaz naturel, permettant aux pays de s'affranchir de leur dépendance aux importations de combustibles et d'accroître leur sécurité énergétique.

D'importantes réserves géothermiques, à des températures de 12 °C à 150 °C sont disponibles en France. Elles sont tellement abondantes que l'exploitation des nappes par exemple, suffirait à couvrir la quasi-totalité des besoins calorifiques pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, soit d'économiser 40 millions de TEP par an.

En fait, il n'y a pas une géothermie, mais différents types de géothermies :

relier, rétablir ou améliorer les différents réservoirs d'eau chaude du sous-sol. Ces failles, très propices à la géothermie profonde, sont situées le long du rift européen qui va d'Oslo à Barcelone en passant par l'Alsace et les Cévennes (zone fracturées, fossés d'effondrement). Le potentiel de la géothermie profonde est considérable, mais son exploitation demande des investissements importants qui sont difficiles à rentabiliser, d'autant plus que la production d'électricité géothermique est la seule qui ne bénéficie pas de subventions depuis la dernière PPE (Programmation Pluriannuelle de l'Energie).

## Les réseaux de chaleur

Des gisements importants de géothermie profonde existent sous les bassins sédimentaires et permettent de produire de la chaleur en grande quantité. Ainsi, dans la région parisienne, des centaines de milliers de logements sont chauffés depuis les années 1970 par des réseaux de chaleur. Grâce aux nappes présentes dans le sous-sol de la région, l'Île-de-France est dotée d'un des plus importants gisements en chaleur d'origine géothermique.

C'est la raison pour laquelle elle compte la plupart des forages exploités, mis en service dans les années 80 pour la grande majorité. Aujourd'hui, cette technique connaît un nouvel essor :

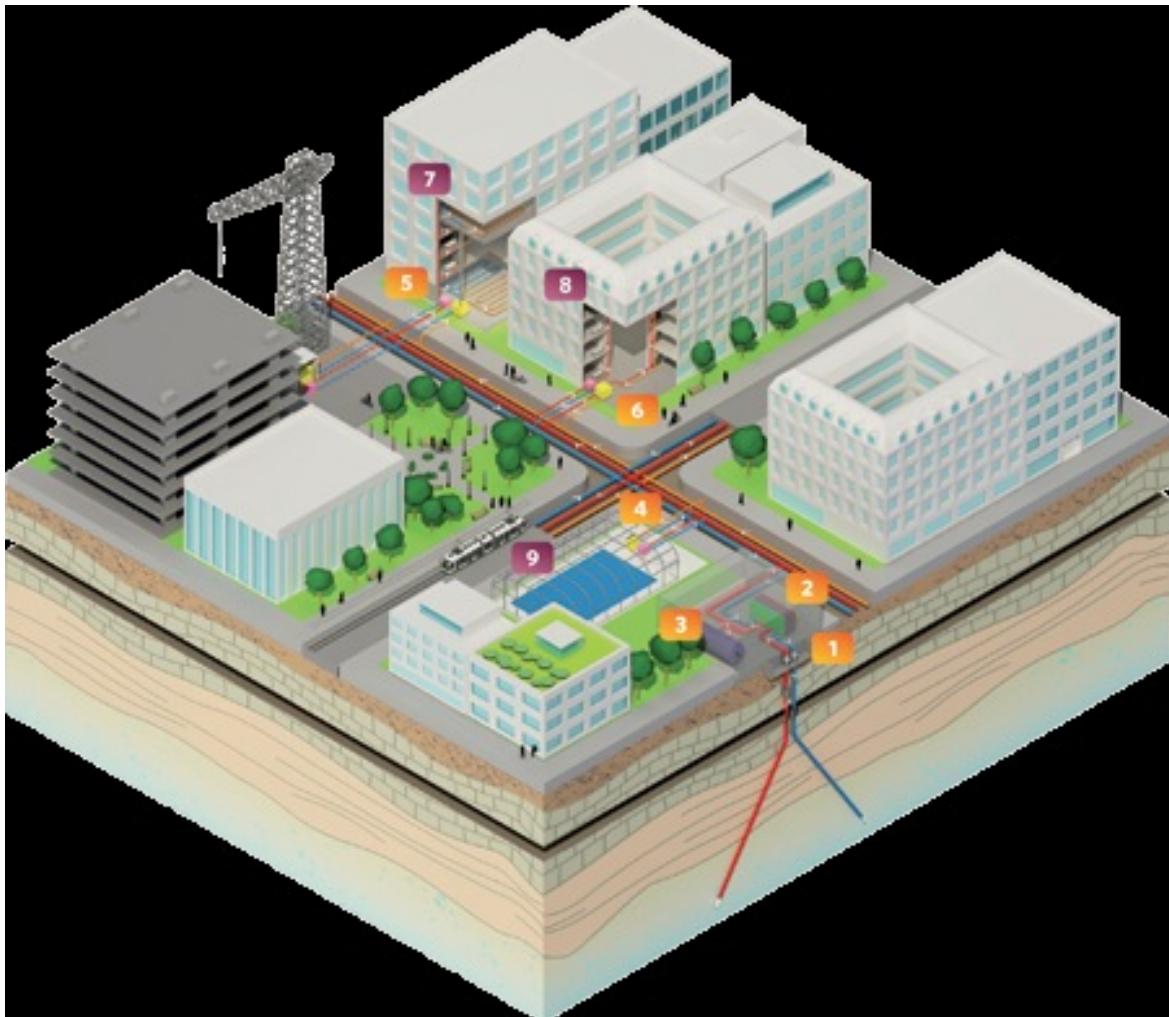
À l'orée des années 2000, la commune d'Orly a été l'une des premières à envisager la possibilité de réaliser un nouveau « doublet géothermique » (en géothermie « sur nappe », il faut deux forages, voire trois : un puits d'extraction est associé à un, ou deux, puits de réinjection.)



On réinjecte en effet la même eau que celle qu'on a prélevée, évitant à l'environnement d'être atteint par d'éventuelles propriétés physico-chimiques de l'eau souterraine). Cette installation exploite la nappe aquifère présente dans la couche géologique du Dogger, à 1800 mètres de profondeur.

L'eau, puisée à 75°C, est acheminée vers la centrale alimentant le réseau de chaleur de la Ville d'Orly. Environ 8000 équivalents-logements, répartis sur Orly et la commune voisine de Choisy-le-Roi, sont raccordés à ce réseau et sont fournis pour les besoins de chauffage et aussi d'ECS (eau chaude sanitaire) à hauteur de 80 % de bientôt 2 millions de personnes.

Un autre exemple en France (Occitanie) est celui de Blagnac près de Toulouse : l'eau chaude est puisée dans le sous-sol à 1500 m environ. Cette chaleur est utilisée pour chauffer les immeubles, les piscines et bâtiments (37 postes de livraison). L'eau, puisée à une température moyenne de 59°C, est réchauffée jusqu'à 70°C à travers un système de pompes à chaleur haute température avant d'y être distribuée à travers le réseau de chaleur.



Croquis de ce type d'installations de réseaux de chaleur

1 – Pompe, puits de production (rouge), puits d'injection (bleu), tête de puits

2 – Centrale géothermique

3 – Chaufferie d'appoint

4 – Réseau enterré

5 – Echangeur pour le chauffage

6 – Echangeur pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS)

7 – Bâtiment chauffé pour radiateurs haute température

8 – Bâtiment chauffé par plancher chauffant basse température

9 – Piscine chauffée en basse température

Il faut savoir qu'on pourra sans doute en même temps utiliser ce type d'installation pour capturer le CO<sub>2</sub> (procédé en cours de recherche par le BRGM)



## 2 - La géothermie de proximité (de surface, ou basse et très basse température, disait-on auparavant)

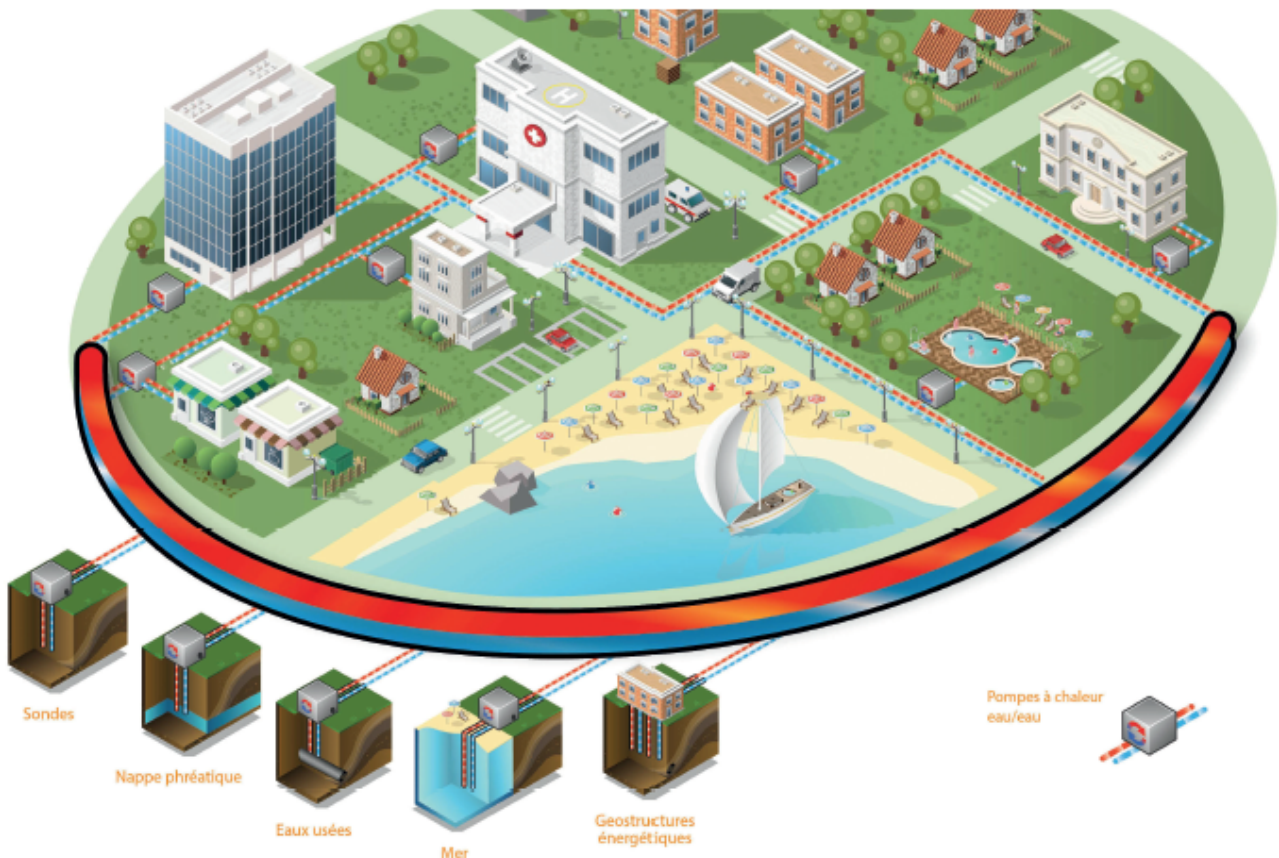
La géothermie dite de proximité ou “de minime importance”(GMI), puise à des profondeurs allant de 60 cm à 200 mètres maximum. Elle permet de produire de la chaleur et du froid renouvelables, le plus souvent assistée d'un dispositif intermédiaire appelé « pompe à chaleur » (PAC). La PAC utilise la technologie de la thermodynamique : elle prend une « source froide », y prélève des calories qu'elle transporte avec un fluide caloporteur, l'élève à 35-50°C sur un bâtiment (voir aussi un peu plus loin). Dans certains cas, on peut s'en passer si on découvre directement de l'eau à 50°C (ce qui s'appelle une anomalie géothermique) comme dans le Lodévois par exemple, mais aussi dans l'est de l'Occitanie, où il se trouve de nombreuses sources chaudes (dans des stations thermales).

Cette géothermie, assistée ou non par pompe à chaleur, extrait les thermies (ou calories) du sol et du sous-sol, en utilisant des sondes verticales, soit « sèches », soit sur nappes, parfois en puisant l'eau souterraine, plus souvent en prélevant ses thermies par un cycle fermé.

Elle fournit le **chauffage et l'eau chaude sanitaire** (ECS) et peut être complétée favorablement par le **rafraîchissement** (*géo-cooling* ou *free-cooling*), qui consiste à faire fonctionner en été le système géothermique en inversant la PAC, ou bien, de produire passivement de la fraîcheur, ce qui la rend encore plus rentable <sup>1</sup>.

Elle peut être utilisée par des collectivités locales pour les bâtiments municipaux, tertiaire-bureaux, écoles, hôpitaux, mairies, des éco quartiers, à partir de réseaux de chaleur ou à partir de **boucles d'eau tempérée** (température plus basse) comme le montre la figure ci-dessous, ou encore par des particuliers pour leur maison individuelle.

<sup>1</sup> Par un jeu de vannes hydrauliques, on inverse le système.



La boucle d'eau tempérée à énergie géothermique (source APFG)

Mais cela va bien au-delà : les applications sont multiples : le chauffage de serres, de piscines, de naissains d'huîtres, de piscicultures, d'aquaponie (élevage d'esturgeons en un temps réduit)... s'ajoutent au chauffage, au rafraîchissement et à l'eau chaude de nombreux bâtiments publics et administratifs : musées, mairies, palais des congrès, salles de spectacles, lycées...). Cela peut être développé avec des quartiers (éco-quartiers) qui peuvent comprendre jusqu'à 1000 logements.

Mais aussi les sources d'énergie primaire sont diversifiées : on peut utiliser des eaux usées (ex à Marseille pour chauffer deux piscines à 28°C), l'eau des étangs, des lacs, et de la mer. Pour cette dernière, on utilise le terme de thalasso thermie. Celle-ci est en train de connaître un essor important le long du littoral méditerranéen : il existe déjà des installations à Marseille, à la Seyne sur Mer, au port de Marseille, à Sète, et des projets ont démarré au Cap d'Agde, à la Grande Motte et maintes autres localités du bord de mer qui ont décidé de profiter de la température favorable de l'eau de la Méditerranée qui oscille entre 12° et 25 °C.

Ce type de géothermie est le plus vertueux et en même temps le moins connu dans les milieux politiques, parce que la filière est restée en retrait et moins visible, sans incitations suffisantes (la géothermie productrice de chaleur renouvelable reçoit 10 fois moins de subventions que l'électricité renouvelable intermittente : éolien et photovoltaïque) et parce qu'elle n'a pas fait connaître les potentialités des PAC du 21<sup>e</sup> siècle.

*<sup>1</sup> COP = Coefficient de performance de la PAC : Il représente l'efficacité énergétique : calcul du nombre de KWh de chaleur produits pour 1 KWh d'électricité consommée. Le rendement de la PAC air-air fluctue en fonction de la température de l'air extérieure et de la saison. Ce rendement baisse en dessous de 7°C. Le SCOP est une autre mesure qui tient compte du climat et de la performance de la PAC air-air. Ex : A Montpellier : SCOP entre 1,9 à 5 en f° de la PAC.*

Du coup, il y a deux fois moins de foreurs en France qu'en Suisse!

Elle a la réputation d'avoir un coût d'investissement élevé si on la compare à un investissement dans une chaudière à gaz par exemple. Cependant elle est rentable pour les particuliers qui disposent de surcroît d'aides de l'Etat, et pour le secteur collectif et tertiaire qui bénéficie, entre autres, du fonds chaleur de l'ADEME (temps de retour sur investissement : entre 7 et 12 ans).

C'est le moment de mettre le braquet sur cette énergie pour remplacer aussi le chauffage électrique des bâtiments (conséquence d'une politique du tout électrique des années 60), à l'heure où on envisage de supprimer des réacteurs nucléaires.

Il faut éviter de la confondre avec l'aérothermie (PAC air-air ou « climatiseur réversible » (dont la COP<sup>1</sup> est de 2,5 en moyenne)) dont l'efficacité est bien moindre : les PAC « sol-eau » ou « eau-eau », indépendantes des températures extérieures, ont une COP qui va de 4 à 7). De plus, contrairement à la géothermie, l'aérothermie, ne peut pas se passer, comme les réfrigérateurs, de fluide frigorigène qui peut être polluant en cas de fuites.

## Quelles sont les possibilités pour les particuliers ?

On peut chauffer à la géothermie, soit à partir de capteurs horizontaux enterrés à 60-80 cm de profondeur dans un jardin (c'est de la géothermie solaire) qui nécessitent un terrassement assez limité, ou à partir de corbeilles de 2 m de hauteur, ou de sondes verticales à environ 100-150 m nécessitant un ou plusieurs forages, s'il n'y a pas de contraintes d'accès pour le matériel de forage.

Dans les sondes verticales passe de l'eau glycolée : on dit que le système est « tout eau » et que la PAC est « eau-eau ». Dans la PAC circule un fluide fermé qu'on a amélioré au fil des temps.

Pour ces projets, l'aide d'un bureau d'études thermique pourra être nécessaire, pour étudier entre autres le dimensionnement de l'installation.

## Les pompes à chaleur (PAC)

Les pompes à chaleur servent les solutions géothermiques dans beaucoup de cas, lorsque la température de la « source » n'est pas tout à fait suffisante, par exemple dans le cas des pompes « air-eau », lorsque les logements ne disposent d'un terrain adéquat suffisant pour déployer des sondes pour capter la chaleur. Elles constituent un atout majeur dans un contexte de déploiement des solutions électriques et d'abandon prévisible des énergies fossiles.

Une pompe à chaleur, c'est un peu comme un réfrigérateur, la PAC étant « un frigidaire à l'envers ».

Elle comprend principalement un compresseur (comme un réfrigérateur), et peut consommer jusqu'à 6 fois moins d'électricité qu'un chauffage électrique classique.

On a noté dans les développements précédents que lorsque la source de chaleur n'est pas à une température suffisante pour chauffer un bâtiment, on utilise, pour obtenir le résultat escompté, des pompes à chaleur, de puissances diverses selon l'objectif recherché (chauffage de logements collectifs ou individuels...), et selon la température de la source.

Il en existe de plusieurs sortes, que l'on utilise des sondes géothermiques, pour alimenter un chauffage central, ou tout autre dispositif comme des capteurs horizontaux.

Un système géothermique pour un particulier coûte 15 000 €, dont sera déduite une aide d'état : la prime RENOVA, qui couvre une grande partie de l'investissement, si vous avez une vieille chaudière (dans la limite de certains revenus). A l'usage ensuite, le fonctionnement coûte moins de 200 € d'électricité par an (eau chaude sanitaire non comprise) au lieu de 1600-2000 € de fuel, pour une maison de 120m<sup>2</sup> par exemple. Bref l'usager divise par 2,5 à 4 sa facture de chauffage, s'il avait auparavant une chaudière à fuel ou gaz.

Ces techniques sont majoritairement employées pour chauffer, par planchers chauffants, radiateurs basse consommation ou ventilo-convecteurs, et pour produire l'eau chaude sanitaire des bâtiments.

La part des pompes à chaleur dans les ventes d'équipements de chauffage devrait tripler d'ici à 2030. C'est une bonne chose, mais c'est insuffisant. Ce déploiement devrait également s'accompagner de gains de performance énergétique afin de générer des économies d'énergie plus importantes.

En revanche, l'achat et l'utilisation accrue des climatiseurs par les ménages et les bâtiments tertiaires n'est pas une bonne chose, car elle devrait d'ici à 2050 faire bondir la consommation d'électricité mondiale à un niveau sans précédent : ainsi, 6 200 TWh pourraient être consommés en 2050 pour climatiser les bâtiments, soit trois fois plus qu'aujourd'hui (AIE, 2018). La géothermie avec PAC est préférable, car elle peut permettre de rafraîchir des locaux sans dépense de fonctionnement supplémentaire.

## **La chaleur produite (ou récupérée) peut être stockée, en sous-sol**

L'eau chaude pourrait être utilement stockée en sous-sol (ou alimenter un stockage de chaleur), non seulement pour le chauffage et l'eau chaude, mais aussi pour d'autres usages. Deux expériences intéressantes ouvrent la voie à cette possibilité. C'est d'abord l'expérience de stockage de chaleur inter saisonnier de La Communauté solaire de Drake Landing, un éco quartier de 52 habitations individuelles situé dans l'Alberta au Canada. Le quartier est conçu de manière que 90 % des besoins de chauffage annuel des habitations soient couverts grâce à la chaleur produite par des panneaux solaires thermiques. Afin d'atteindre ce rendement, 800 collecteurs solaires ont été installés sur les toits des 52 garages, et un système de stockage de chaleur saisonnier souterrain a été mis en place. En hiver, la chaleur est déstockée du système de stockage pour être ensuite distribuée via le réseau de chaleur. En 2012, 97 % des besoins de chauffage de la communauté ont été couverts par l'énergie solaire, ce qui constitue un record mondial pour une installation de cette taille.

Cette solution est en train de se mettre en place en France avec la société NewHeat qui vient d'inaugurer Narbosol, une centrale solaire thermique qui contribue à la fourniture de chaleur renouvelable au réseau de chauffage urbain de Narbonne.

## **Bilan de cette énergie renouvelable**

**La géothermie profonde** a beaucoup d'atouts par rapport aux autres énergies renouvelables : **occupation du sol pratiquement inexistante (un local technique), pas de bruit**, ni de trafic routier induit, **quasiment aucun impact sur le plan visuel, ni sur la biodiversité**. C'est une source d'énergie discrète et, on l'a vu, **quasi inépuisable si le système est correctement dimensionné. Le bilan financier est bien meilleur qu'avec l'utilisation d'une source fossile**. Le forage (100 € le mètre linéaire en moyenne) représente la moitié du coût d'un système géothermique dans le collectif et le tertiaire. Pour un réseau de chaleur, c'est le réseau lui-même de distribution de la chaleur dans l'agglomération qui est le plus coûteux, mais une fois les structures installées, c'est très économique pour l'utilisateur. C'est ce qu'ont compris beaucoup de municipalités de l'Île de France, qui ont pu faire baisser les factures des abonnés (jusqu'à 30 %).

Mieux encore et venant aussi du Canada, selon le même principe : **les BTES, des sondes géothermiques pour stocker la chaleur renouvelable**

Un « Borehole Thermal Energy Storage » (borehole : forage), invention canadienne, est un champ de sondes (sèches) géothermiques rapprochées (de 2 à 4 m) utilisées à des fins de stockage de chaleur dans le sol. Les sondes (jusqu'à une profondeur de 200m) sont des circuits fermés de faible diamètre dans lesquels circule un fluide caloporteur permettant des échanges thermiques. On peut les contrôler, mieux moduler la température avec le stockage (savoir ce qu'on entre et ce qu'on sort), avec ces sondes. En plein été, lorsque les climatiseurs tournent à plein régime, les sondes géothermiques récupèrent la chaleur fatale, habituellement perdue, des processus de climatisation du bâtiment... et restituent la chaleur en période hivernale.

Le deuxième atout, et non des moindres, c'est que **ça fonctionne 24 heures sur 24**, contrairement à l'énergie solaire et surtout à l'éolien dont le défaut majeur est l'intermittence. C'est une énergie pilotable et pérenne, de surcroît sans impact sur l'environnement, et donc bien acceptée.

Il n'est que juste d'énumérer les avantages de cette source d'énergie : décarbonée, elle émet très peu de GES (gaz à effet de serre), aucune particule fine. Elle ne pollue pas et son exploitation a un très faible impact sur les paysages comme sur le voisinage, pas de bruit, pas de fumée...

**La géothermie de proximité est réalisable** presque partout, sur sondes sèches verticales : sur 92% du territoire occitan par exemple, et sur nappe, sur 25% de ce territoire, donc c'est une source d'énergie locale, par ailleurs continue, et, avantage non négligeable, indépendante des conditions climatiques.

Aux niveaux technique et économique, les avantages sont aussi très nombreux :

La puissance est élevée et constante.

Dans les petites installations, elle diminue considérablement la facture des utilisateurs (voir plus haut). Pour 1 KW d'électricité consommée par une pompe à chaleur (PAC) eau-eau, on récupère 4 à 6 KW thermiques.

**On ne saurait tarir d'éloges sur cette énergie renouvelable.**

Elle est indépendante des variations de coût des énergies fossiles et de l'énergie en général. L'approvisionnement est indépendant de la géopolitique, libère le pays de sa dépendance énergétique. De plus, les forages réalisés le sont pour plusieurs générations. Enfin, il n'y a aucune incertitude sur l'approvisionnement et sur son coût. Son prix est stable : contrairement à celui du gaz et du pétrole, on peut maîtriser le coût de la géothermie sur trente ans.

C'est aussi pourquoi nous comprenons mal le peu de subventions accordées encore à cette EnR déjà opérationnelle et mature, et qui n'offre que des avantages. Pourquoi hésiterait-on à en généraliser l'utilisation, entre autres dans les bâtiments collectifs et tertiaires qui sont encore chauffés au fuel et gaz et refroidis à la clim air-air, puisque en termes de stock, les réserves profondes en calories des deux premiers kilomètres de la croûte terrestre sont plusieurs milliers de fois supérieures à celles des combustibles fossiles ?

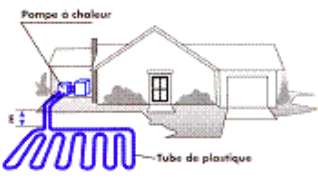
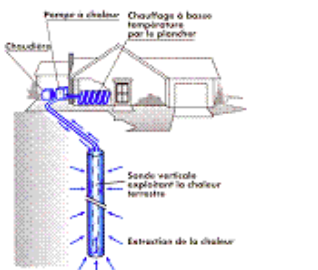

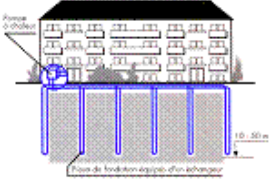
**Note particulière sur la géothermie profonde productrice d'électricité :**

Des secousses sismiques dues à une pression trop forte dans un puits d'injection de 5 kilomètres de profondeur se sont produites près de Strasbourg, à une échelle perceptible par les habitants de cette métropole. Cela s'était produit aussi près de Bâle il y a une quarantaine d'années. A ce sujet, il est bon de savoir que dans le cadre de l'expérimentation de Soultz-les-Forêts (recherche en géothermie profonde), on évite ce qui a été fait récemment près de Strasbourg, à savoir d'utiliser des acides forts et une pression trop forte. On y invite à utiliser de la saumure ou de l'acide glutamique biodégradable et organique et à réduire la pression d'injection à moins de 20 bars, ce qui évite tout séisme.

**Il faut donc encourager cette filière vertueuse,** lui accorder une priorité. L'obstacle, ce sont les lobbies très puissants des énergies renouvelables électriques intermittentes qui entendent bien préserver le système mis en place des subventions exorbitantes et de tarifs de rachat de l'électricité incitatifs qui leur permettent d'engranger d'énormes profits. Or un Etat ne peut pas subventionner tout à la fois, il doit choisir ses priorités. Actuellement, c'est un fait, les états n'ont pas choisi les meilleures et les plus utiles à la société.

## Annexe : RAPPEL SUR LES DIFFERENTS DISPOSITIFS D'EXPLOITATION (Hors géothermie profonde)

NB - Profondeur maximale de la géothermie « de minime importance » : 200 m

	Profondeur moyenne	Application
 <p>Pompe à chaleur Tubes de plastique</p> <p><b>Capteurs horizontaux</b></p>	0,5 à 1,5 m	<b>Individuel uniquement</b>
 <p>Pompe à chaleur Chaudière Chauffage à basse température par le plancher Sonde verticale exploitant la chaleur terrestre Extraction de la chaleur</p> <p><b>Sonde géothermale appelé aussi Capteur vertical</b></p>	50 à 100 m  Peut atteindre plusieurs centaines de mètres  Champ de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de sondes	<b>En individuel</b>  <b>En collectif</b>
 <p><b>PAC sur Aquifères</b> Avec ou sans forage de réinjection</p>	10 à 100 m  De quelques dizaines de mètres à plusieurs centaines de mètres	<b>En individuel</b>  <b>En collectif</b>
 <p>Pompe à chaleur Pieux de fondation équipés d'échangeurs thermiques</p> <p><b>Géostructures</b></p>	5 à 20 m	<b>En collectif ou tertiaire</b>

## GÉOTHERMIE INDIVIDUELLE, POUR PARTICULIERS

Quelques explications et schémas:

Les techniques de géothermie ont beaucoup évolué en offres de matériel, en performance et surtout ont appris des erreurs du passé. Ainsi, des logiciels à destination des professionnels ont été développés par les spécialistes de la géothermie française pour fournir avec le plus de justesse possible le chauffage, l'eau chaude sanitaire (ECS) et le rafraîchissement (géo-cooling ou freecooling) des maisons individuelles, sans surdimensionnement des systèmes.

Deux tranchées de 30 à 40 m de long pour une maison individuelle de 120m<sup>2</sup> suffisent à fournir suffisamment de chauffage dans le Sud de la France. Profiter des fondations lors de la construction d'un bâtiment pour y placer des capteurs géothermiques est la solution la plus économique.

### 1 - LES CAPTEURS HORIZONTAUX

### 2 - LES CORBEILLES :

Les corbeilles offrent aussi une alternative aux capteurs horizontaux qui occupent plus de place ou aux sondes qui nécessitent de créer des forages.

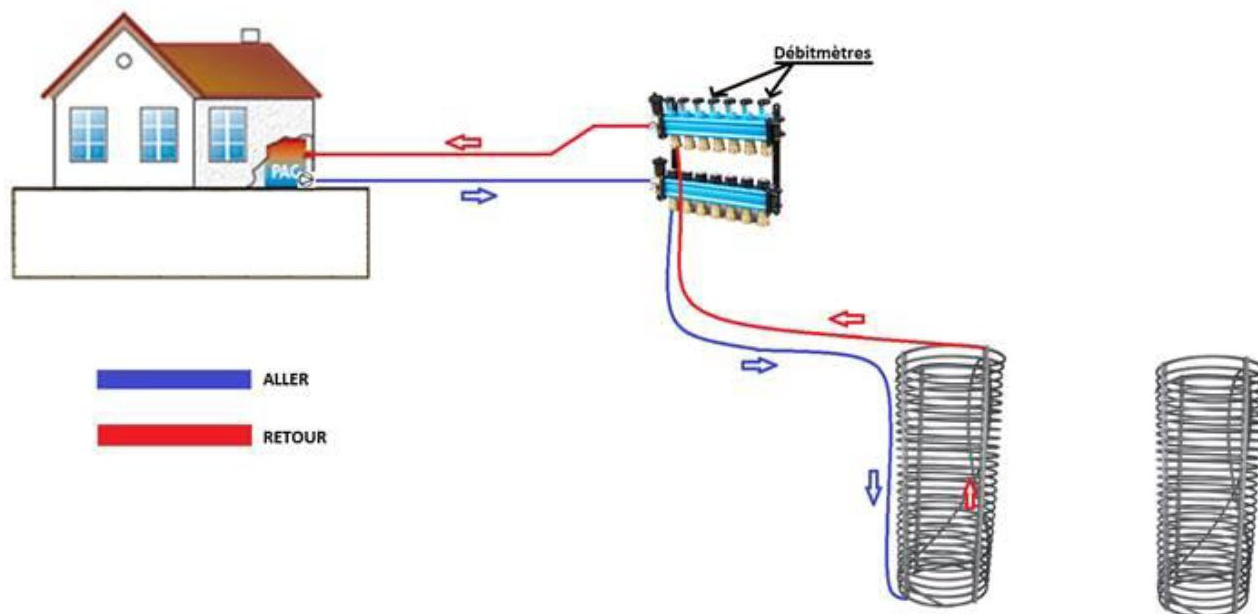
Constituées par des enroulements de tuyauteries de polyéthylène en spirales, elles peuvent être descendues dans des excavations de quelques mètres de profondeur. Le fluide caloporteur (eau glycolée) circule dans les spirales de l'extérieur de la corbeille afin de capter le maximum de chaleur puis remonte par l'intérieur afin de ne pas se refroidir.

Les corbeilles sont implantées à une profondeur de 3,5 m, permettant de s'affranchir ainsi des variations saisonnières de la température.

L'espacement minimum entre chaque corbeille est de l'ordre de 3-4 m.

Elles peuvent être coniques ou cylindriques:

**Schéma général pour corbeilles géothermiques avec PAC (puissance en sortie : 7-8 KW) pour une maison individuelle - plancher chauffant 35°C.**



Autres informations dans :

**AFPG.asso.fr**

[www.geothermie-perspectives.fr](http://www.geothermie-perspectives.fr)

[geothermies.fr](http://geothermies.fr)

<https://www.plancher-chauffant-caleosol.fr/geothermie/corbeille-geothermique-puissance>

## Chapitre 3

### La biomasse

La biomasse, ce sont des matériaux d'origine biologique employés comme combustibles pour la production de chaleur, d'électricité ou de carburants.

Elle comprend trois familles principales :

- Le **bois énergie** ou biomasse solide, énergie primaire produisant par combustion de la chaleur
- La **méthanisation** par décomposition des déchets agricoles et ménagers produisant du biogaz
- la **synthèse chimique de plantes agricoles pour produire des biocarburants**

La biomasse correspond donc à la part biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de la sylviculture et de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, et des industries connexes, ainsi que de la part biodégradable des déchets industriels et ménagers.

De fait, cette énergie dite renouvelable est un peu un fourre-tout, car elle est produite à partir du bois certes, mais aussi des déchets ménagers et industriels, mais encore d'algues, de champignons... voire de plantes cultivées, et chacune des « familles » mérite d'être examinée séparément.

L'utiliser pour produire de l'électricité n'est pas une bonne solution. Le rendement énergétique global moyen de transformation de sa chaleur de combustion en électricité est faible, au mieux de 30 % : c'est le plus faible de toutes les centrales thermiques. Elle est mieux utilisée pour produire de la chaleur, car le rendement énergétique bien que très variable suivant les installations, est alors meilleur et peut atteindre jusqu'à 90 % par exemple dans certaines chaudières à granulés.

C'est encore la première source d'énergie « renouvelable » en Europe, avec 4 à 5 % de son approvisionnement en énergie primaire.

### Le bois-énergie

Le bois a été essentiellement la seule source d'énergie, depuis l'origine, avant l'hydraulique ; il n'a été concurrencé et dépassé en tant que tel que très récemment, de l'ordre de deux siècles, par les sources fossiles que sont le charbon, puis le pétrole, puis le gaz. Heureusement, car au 19ème siècle, avant l'avènement du charbon, l'utilisation massive du bois était un facteur massif de déforestation en Europe. Aujourd'hui encore, dans le monde, « 2,5 milliards de personnes n'ont que le bois pour se chauffer, s'éclairer, et cuisiner » (source Planète énergie). Mais pourquoi ajouter « énergie » au bois ? Simplement, parce que le bois a de multiples usages et que l'énergie n'en est qu'un parmi les autres. Et pourquoi le bois énergie est-il catalogué comme source renouvelable mondialement, alors que les professionnels, dont France Nature Environnement estiment qu'il faut, en moyenne, 30 ans pour retrouver une absorption de CO2 égale après une coupe d'arbres ? La seule réglementation est que la quantité de bois coupée annuellement soit inférieure à celle produite par la nature sur l'ensemble d'un pays ; au-delà, c'est de la déforestation (voir aussi un peu plus loin).

Aujourd'hui encore, le bois est utilisé surtout pour le chauffage domestique, surtout en milieu rural et industriellement, dans des centrales produisant de la chaleur et, parfois aussi, de l'électricité.

Le plus souvent, on utilise des déchets forestiers comme à Saint-Affrique en Aveyron où s'est construit un réseau de chaleur qui fournit les 34 bâtiments de la ville (hôpital, écoles, piscines, HLM...). La chaufferie est alimentée par la filière bois locale qui fournit un mélange de plaquettes forestières (bûches, bois d'élagage, branchages, bois abimés, paille, donc résidus de toute origine...) et est d'une puissance de 3 MW.



La chaufferie bois collective semble être choisie pour des raisons financières, le prix de la chaleur bois étant inférieur au prix de référence (gaz). La facture énergétique est stable aussi dans le temps. Mais les gens qui vivent près d'une chaufferie bois respirent des GES et même des particules fines qui sont dangereuses pour la santé. Le principal reproche que l'on fait à la filière bois- collective, c'est le coût (financier et en CO2) du transport des matières ligneuses (15% du prix final de l'énergie bois). Enfin le bois doit avoir 12% d'humidité pour aller en chaufferie, ce qui oblige parfois à le sécher (avec du combustible fossile !) Nous avons même appris que, pour améliorer la combustion du bois, on y ajoute de la poudre de pneu ! Cette pratique extrêmement polluante devrait être prohibée...

La filière bois, à une échelle plus modeste, c'est le chauffage des logements des particuliers qui utilisent des inserts, des poêles et des âtres ouverts (beaucoup de déperditions, déconseillé, car 30 fois plus de pollution qu'un foyer fermé), pour brûler les bûches, des pellets ou granulés... Les milieux officiels estiment que d'ici 2020, l'amélioration des appareils de chauffage au bois domestiques devrait permettre d'équiper 9 millions de logements en France contre près de 6 millions aujourd'hui avec une consommation de combustible égale (7,4 Mtep). En effet, près de 4 millions d'appareils anciens seraient remplacés par des appareils modernes moins consommateurs de bois.

## **Quelles sont les limites de cette filière ?**

D'une part, même si les appareils sont beaucoup plus efficaces et si l'émission de particules est réduite (par l'utilisation d'un filtre), les rejets de particules fines, de monoxyde de carbone, des oxydes d'azote, des organochlorés, du dioxyde de soufre persistent à l'intérieur des maisons et sont toxiques (alors qu'à l'extérieur, l'air est brassé).

La biomasse solide est en fait la source carbonée qui émet lors de sa combustion le plus de CO2, mais aussi de polluants atmosphériques pour une même quantité d'énergie produite, plus encore que le charbon ! On nous explique alors que le CO2 ainsi produit étant utilisé par les végétaux lors de leur croissance, la combustion de la biomasse est neutre en émissions de CO2, mises à part les quantités émises par les engins utilisés pour la culture, la collecte et le conditionnement ! Cela ne serait valable que si la croissance des végétaux utilisait immédiatement autant

de CO2 qu'il en est produit par la combustion de la biomasse utilisée. C'est faux, et cette affirmation est une des très nombreuses zones d'ombre où s'abrite l'Ecologie politique.

On a plébiscité cette filière bois énergie en France depuis 15 ans parce que le bois de nos forêts est bien exploité et est donc renouvelable, cependant on n'avait pas anticipé que le bois est très polluant. La ressource n'est pas illimitée : elle n'est considérée comme une énergie renouvelable que dans la mesure où on ne prélève pas plus que la capacité de renouvellement et surtout si on ne va pas chercher le bois à des milliers de kilomètres comme c'est parfois le cas. Au delà, répétons-le, on déstocke, comme c'est le cas pour les énergies fossiles. Et c'est ce qui nous attendrait si la filière prenait trop d'ampleur.

On voit ce qui se passe à l'échelle mondiale : selon la FAO, la forêt mondiale perd 13 millions d'ha par an, quasiment l'équivalent de la forêt française ! (15,6 millions d'ha). À ce rythme-là, la forêt mondiale (4 milliards d'ha) est condamnée à terme dans environ 300 ans. En France (où on pourrait l'exploiter une fois et demi plus (en termes de gestion durable), la forêt n'est épargnée qu'en raison d'importations massives de bois d'œuvre d'Afrique, livrée à une surexploitation éhontée. De plus, les fortes chaleurs et les grandes sécheresses de ces dernières années créent des difficultés pour les forêts, mettant la ressource en danger, s'ajoutant aux dégâts provoqués par les scolytes, parasites qui entraînent la mort des arbres.

Le film récent produit par Michael Moore (« *Planet of Human* ») montrerait, s'il en était besoin, à quel point les industriels, aux Etats-Unis, se soucient fort peu de la capacité de renouvellement des forêts et ont déjà dévasté de nombreuses forêts magnifiques. Ce schéma, dans le contexte actuel, peut se produire partout, y compris en France.

Notre jugement par rapport à cette filière est donc mitigé.

Les médias n'évoquent guère la pollution atmosphérique produite par les centrales électriques à biomasse, d'autant plus importante que l'on mélange à la biomasse des déchets de toutes sortes, comme par exemple des broyats de pneus usagés (cf. plus haut). En cela, les centrales à biomasse servent souvent à se débarrasser de déchets organiques, en dépit de la pollution qui en résulte. Certains pays, comme les Pays-Bas, ne considèrent plus la combustion de la biomasse comme « soutenable » d'un point de vue climatique.

Ceci était la principale utilisation de matières carboniques sous forme de combustion. Il en existe d'autres :

## Autres utilisations de la biomasse

**L'incinération** qui consiste à brûler des déchets (déchets ménagers, déchets des industries de transformation du bois et végétaux agricoles,...) dans des usines et à se servir de la vapeur d'eau dégagée pour produire de l'électricité. La vapeur peut aussi être utilisée pour produire de l'énergie mécanique ou pour circuler directement dans les réseaux de chauffage urbain. Certaines villes utilisant cette méthode pour chauffer des logements, la qualifient d'écologique. C'est pour le moins exagéré, car les émissions de particules et de gaz (dont la dioxine) obligent à l'installation de filtres de plus en plus complexes et coûteux (d'autant plus qu'il faut les remplacer régulièrement). Cette méthode d'élimination des déchets est condamnée, à juste titre, par l'Europe, qui la considère comme renouvelable à 50% seulement (en raison du fait qu'on brûle les déchets organiques), mais ça n'a pas de sens puisque les autres 50 % sont déplorables, s'agissant surtout de matières plastiques.

D'autres méthodes, plus rares, existent pour traiter les mêmes déchets, mais ne sont pas davantage convaincantes :

**La gazéification** de la biomasse solide est réalisée dans un réacteur spécifique, le gazogène. Elle consiste en une réaction entre le carbone issu de la biomasse et des gaz réactants (la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone). Le résultat est la transformation complète de la matière solide, hormis les cendres, en un gaz combustible composé d'hydrogène et d'oxyde de carbone. Ce gaz, après épuration et filtration, est brûlé dans un moteur à combustion pour la production d'énergie mécanique ou d'électricité. La cogénération est également possible avec la technique de gazéification (production de chaleur).

## La méthanisation

Il existe une autre manière de traiter les déchets ménagers si on veut produire de l'énergie, c'est la **méthanisation**, qui repose sur la dégradation, dans un digesteur chauffé et sans oxygène (réaction en milieu anaérobie) de la matière organique (déchets ménagers, fumier, lisier d'animaux, papiers et cartons...) par des bactéries, qui produit un mélange de gaz baptisé « biogaz », composé de biométhane et de dioxyde de carbone.

Le grand avantage de ce procédé est qu'il permet de créer un équivalent du gaz naturel fossile, qui peut être injecté dans un circuit de gaz naturel existant, ou transformé en électricité et/ou en chaleur (cogénération).

La méthanisation se pratique dans de grosses usines, mais aussi dans des centres d'enfouissement de déchets, des stations d'épuration urbaines, ou des stations d'épuration industrielles, ou encore dans les grosses fermes, comme ci-dessous.



Les usines de méthanisation de déchets ménagers sont souvent source de problèmes, surtout si les déchets ménagers n'ont pas fait l'objet d'un tri visant à séparer la matière organique des autres déchets, dont les plastiques de toutes sortes, le rebut de cette méthode de traitement, qu'on appelle le digestat, doit dans ce cas être incinéré ou mis en décharge.

Si La loi française prévoit qu'à partir de 2025, ce tri doit être généralisé, à ce moment-là, on pourra valablement choisir entre la méthanisation (sur bio-déchets) et le compostage qui permettrait de fournir l'agriculture en engrais naturel et écologique et d'éviter ainsi la dégradation des sols par les engrais chimiques. A noter que les digestats issus de bio-déchets (s'ils sont bien triés), sont exploitables, comme le compost, pour amender les terres.

Dans les fermes, les problèmes ne manquent pas non plus : des émanations de gaz, la contamination de nappes phréatiques... De plus, la méthanisation étant plus rentable que l'agriculture elle-même, celle-ci fait l'objet de moins d'attentions, avec les conséquences que cela peut comporter (il est signalé que dans certains pays, certaines exploitations ont complètement abandonné l'agriculture).

Un choix est donc possible pour le traitement des déchets, mais comment faire autrement que de passer d'abord par la méthanisation les boues de station d'épuration, le lisier des porcs et des bovins ? La méthanisation a donc sa place.

Cependant, il n'est pas inutile de rappeler qu'en raison des nombreux problèmes de pollution non maîtrisés, de nombreuses associations de défense se sont constituées pour obtenir une meilleure gestion de ces process.

D'autre part, il est important de savoir que les milieux officiels comptent beaucoup, dans le cadre de la transition énergétique, sur le biogaz et le méthane ainsi obtenus, parce que c'est considéré comme une énergie renouvelable : en effet, il n'y a pas à puiser dans les ressources limitées de la terre et les déchets se renouvellent sans cesse. Mais c'est finalement très polluant. De plus, c'est cher. C'est pourquoi un certain nombre d'experts appellent à ne pas aller trop vite en besogne : ils conseillent de ne pas abandonner trop vite le gaz naturel dont les réserves restent très élevées au niveau mondial et qui est moins polluant que les produits pétroliers et le charbon.

**En plus de la méthanisation, il existe d'autres technologies pour produire du gaz, fondées essentiellement sur la pyrolyse** : c'est la décomposition de la matière carbonée sous l'action de la chaleur. Elle conduit à la production d'un solide, le charbon de bois ou le charbon végétal, d'un liquide, l'huile pyrolytique, et d'un gaz combustible. Une variante de la pyrolyse, la thermolyse, est développée actuellement pour le traitement des déchets organiques ménagers ou des biomasses contaminées. Voyons le détail :

-la **pyrogazéification** : des combustibles secs passant habituellement par l'incinération (des résidus solides, renouvelables ou pas, comme des résidus de l'exploitation forestière, vieux meubles, tissus, chiffons...) sont brûlés dans une atmosphère pauvre en oxygène. Le méthane produit est injecté dans le réseau. Cette filière est seulement en cours de constitution. En France, on en est à la phase de pilotes industriels.

-la **gazéification hydrothermale** : la biomasse liquide brute, sous une pression de 250 à 300 bars, est brûlée, soit en absence d'oxygène, soit dans une atmosphère appauvrie. Le méthane est ensuite isolé. C'est une solution pour les effluents organiques de l'industrie alimentaire, les boues de station d'épuration, les digestats, qu'on pourrait ainsi éviter d'épandre sur les terres agricoles. Mais on sort à peine de l'étape du démonstrateur.

-la **méthanation** : il s'agit de gaz obtenu par électrolyse de l'eau. L'hydrogène est ensuite combiné avec du CO<sub>2</sub> pour la production de méthane (méthane de synthèse donc). Cette méthode ne produit pas de déchet, mais elle est très énergivore.

Un aspect anecdotique : la **production de « biochar »** par pyrolyse : plutôt que de laisser la matière végétale se décomposer et émettre du CO<sub>2</sub>, la pyrolyse transforme environ la moitié du carbone stocké dans les tissus végétaux en une forme stable et inactive, utilisée comme amendement pour les sols (incorporé une seule fois, il a, paraît-il, un effet durable pendant des siècles). Cette technique de pyrolyse, qui peut aussi produire du gaz, utilise exclusivement des déchets « propres » issus de l'agriculture et de l'exploitation forestière.

## La production de carburant :

Enfin, la troisième famille de biomasse (outre les différentes formes de combustion et outre la méthanisation), c'est la **production de biocarburant** qui se concentre principalement autour de trois filières dites de première génération : la filière huile qui utilise directement les huiles végétales (colza, tournesol, blé, maïs, jatropha ...), brutes ou transformées en diester pour alimenter les moteurs diesels, la filière alcool qui transforme par fermentation les sucres des végétaux en alcool qui peut être ensuite transformé en additif pour carburant, et la filière gaz, qui convertit biogaz et syngaz en hydrocarbures liquides. Les biocarburants sont des carburants liquides ou gazeux créés à partir d'une réaction entre l'huile (colza, tournesol) et l'alcool dans le cas du biodiesel, à partir d'un mélange de sucre fermenté et d'essence dans le cas du bioéthanol .

Ces biocarburants peuvent prendre différentes formes : des esters d'huiles végétales produits, par exemple, à partir du colza (biodiesel) ; de l'éthanol, produit à partir de blé et de betterave, incorporable dans le super sans plomb sous forme d'ETBE (éthyl tertio butyl ether). Cet ETBE favorise l'incorporation d'éthanol dans les essences (jusqu'à 15% du volume dans le SP95 et le SP98, jusqu'à 22% dans le cas du SP95-E10).

<https://www.connaissancedesenergies.org/carburants-quel-est-ce-qui-distingue-le-sp95-e10-du-sp95-131210>

La valorisation de cette biomasse ne produit toutefois pas que des biocarburants, mais aussi des colles, des solvants, des résines, des plastiques, des cosmétiques...

Le principal inconvénient des biocarburants, c'est qu'ils nécessitent une surface de terre cultivable considérable (et ça, c'est préoccupant) pour un rendement plutôt faible.

Toutefois, des biocarburants de deuxième et troisième génération commencent également à se développer sur le marché de la biomasse, en étant produits à partir de résidus non alimentaires de plantes (paille, tiges, bois, microalgues).

Ils auraient pour vertu de ne pas « occuper » un territoire agricole en compétition avec la production d'aliments pour l'homme, mais leur maturité industrielle, tout particulièrement pour la 3<sup>e</sup> génération, reste à établir. Mais s'il n'y a pas de compétition pour les terres agricoles (cela reste à démontrer), on ne pourrait que souhaiter que ces générations de biocarburants deviennent fiables.

## Avantages et inconvénients de l'énergie biomasse

Au niveau mondial, la biomasse couvre près de 12 % des besoins mondiaux en énergie, selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), soit plus de 90,2 GW d'énergie, ce qui n'est pas négligeable. C'est un complément intéressant, surtout le bois énergie utilisé dans une perspective durable, qui pourrait être développé, mais de manière nécessairement limitée.

En effet, Il ne doit pas être demandé à la nature plus qu'elle ne peut produire. L'énergie issue de la biomasse n'est renouvelable et durable que s'il n'y a pas de surexploitation, que si la fertilité des milieux qui la produisent n'est pas mise en péril et s'il n'y a pas d'impact excessif sur la biodiversité. Enfin il faut éviter la compétition pour l'usage des ressources (terres arables, eau).

Pour éviter la pollution atmosphérique, des progrès ont été faits pour limiter l'émission de particules fines lors de la combustion du bois, ce qui pourrait en rendre supportable la charge sur l'environnement, mais certaines formes de traitement des déchets sont à rejeter, comme l'incinération, qui rejettent dans l'atmosphère de nombreux produits toxiques et produit du mâchefer (ce qui reste après combustion), dont on ne sait trop que faire en raison de sa charge toxique. La mise en décharge des rebuts n'est pas non plus une bonne solution.

Le bilan est donc très mitigé. En dehors du bois-énergie qui comme on l'a vu plus haut, peut être exploité à la condition expresse que ce soit de manière durable, il faudrait envisager d'autres solutions au traitement des déchets quels qu'ils soient. Par ailleurs, il serait préférable de renoncer à la production de bio-carburants.

L'urbanisation et l'industrialisation à outrance, y compris de l'agriculture, sont les principales causes des difficultés que nous connaissons dans le domaine du traitement des déchets et les solutions qu'on nous propose aujourd'hui ne sont bien souvent qu'un pis-aller. Il est bien difficile de les qualifier d'écologiques.

## Conclusion provisoire sur l'utilisation de la biomasse :

Il y a de nombreux problèmes : d'une part, la surexploitation éventuelle de la forêt, ce qui réduit à néant la désignation de cette source d'énergie comme renouvelable ( cf. de nombreuses forêts rasées aux Etats-Unis), d'autre part, les nombreuses nuisances qui surviennent, issues des diverses installations de traitements, en particulier des méthaniseurs agricoles : odeurs pestilentielles parfois, effluents, digestats pollués, tout cela dû au fait que les « producteurs » n'ont pas le souci de l'écologie et rejettent dans l'environnement des effluents et des déchets très difficiles à accepter.

Toutefois, si c'était géré correctement et durablement, cette source d'énergie pourrait être considérée comme renouvelable. Bien mené, ce pourrait être aussi une source d'énergie pilotable. Mais si c'est conduit comme aujourd'hui, vouloir multiplier cette production par dix d'ici à 2050, c'est s'exposer à de nombreux déboires.

## Chapitre 4

### La chaleur renouvelable, un vecteur énergétique méconnu

(Thème déjà abordé dans le chapitre sur le stockage de l'énergie. On trouvera ci-dessous des éléments complémentaires)

La chaleur est utilisée de deux manières principales : la plus connue est celle du chauffage des bâtiments et de l'eau chaude sanitaire, mais elle l'est aussi comme vecteur d'énergie dans l'industrie où il est nécessaire d'élever la température de produits. Elle peut être produite, par des combustibles le plus souvent, ou récupérée.

Dans l'industrie, la chaleur résiduelle, dite fatale (parce que inutilisée le plus souvent), provient, dans l'ordre, des fumées de fours, des buées de séchoirs et des fumées de chaudières. Sa valorisation permettrait de sérieux progrès.

Les calculs qui ont été faits à ce sujet montrent que plus du tiers de la consommation de combustibles dans l'industrie est rejetée sous forme de chaleur fatale. **C'est pourquoi il serait particulièrement intéressant de la récupérer, ce d'autant plus qu'à l'échelle mondiale, environ 10 % des émissions de GES (gaz à effet de serre) proviennent aujourd'hui de la production de cette chaleur**, soit autant que les GES combinés des voitures et des avions.

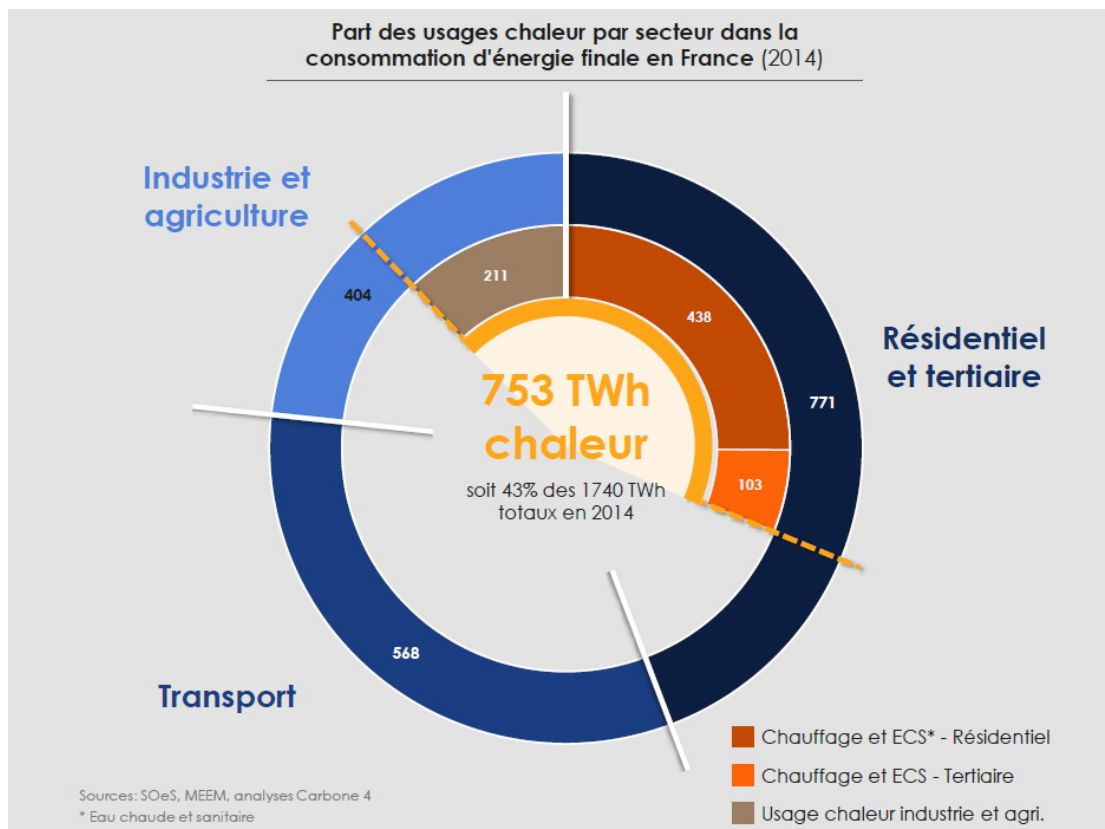
Ce gisement est égal à 70 % de la chaleur déjà diffusée dans les réseaux, ce qui est loin d'être négligeable.

**La décarbonation industrielle passe donc inévitablement par son utilisation dans des réseaux de chaleur urbains, en particulier dans les agglomérations proches des sites industriels (près de 500 communes sont desservies en France, dont beaucoup qui utilisent la géothermie).**

Les autres sources de chaleur utilisables sont le solaire thermique, la chaleur du sous-sol, et celle qui est produite par la biomasse... Elles sont développées dans d'autres chapitres, dont celui consacré au stockage de l'énergie.

Il est particulièrement important de développer ces solutions, car contrairement à l'électricité, la chaleur est plus aisément stockable. Ce qui peut contribuer à résoudre les besoins dans le domaine de son utilisation énergétique. Il faut savoir en effet que la consommation finale de chaleur constitue près de la moitié des usages énergétiques en France (près de 45 % de la demande totale d'énergie finale). C'est d'autant plus important qu'une grande partie du chauffage des logements et des locaux du tertiaire utilise encore le fuel ou le gaz, générateurs de GES.

**Il serait donc efficace qu'elles soient davantage soutenues par les pouvoirs publics qui aident les filières chaleur 8 fois moins que les EnR électriques.**



## Conclusions

### 1 - Vers le « tout électrique » ?

Avant de conclure, on ne peut que constater que l'électricité va prendre une place de plus en plus grande dans la consommation d'énergie dans le monde. La tendance manifeste est d'abandonner les énergies fossiles (dont les réserves s'épuisent de toute façon). Les décisions prises par les gouvernements vont dans ce sens. Elles consistent par exemple à interdire l'utilisation du gaz et du fuel pour le chauffage des immeubles et à faire pression sur l'industrie de l'automobile pour qu'elle produise une proportion de plus en plus grande de véhicules électriques. Ainsi, selon une étude récente du cabinet d'études Roland Berger, la part de l'électricité dans les transports devrait passer de 1% en 2000 à 13% en 2040, dans l'industrie de 19 à 28% et dans le bâtiment de 24 à 53% (*Transitions et Energies N° 7*). Cela peut ne pas paraître très rapide, mais la mutation profonde que cela provoque, dans l'industrie en particulier, demande du temps.

Inexorablement, la demande d'électricité croît : depuis deux décennies, elle a augmenté presque deux fois plus vite que la demande totale d'énergie avec une augmentation de 3% par an. Toujours selon Roland Berger, l'électricité représentera 31% de la consommation d'énergie dans le monde en 2040 contre environ 21% aujourd'hui. En France, le taux d'électrification s'élève déjà à 27% et pourrait atteindre 50% en 2050 selon EDF.

Et cela se comprend puisque l'efficacité énergétique des technologies électriques est trois à cinq fois supérieure à celle des technologies utilisant des énergies fossiles : par exemple, 80 à 90% de l'électricité consommée sert effectivement à propulser les véhicules électriques, alors que pour les véhicules à moteur thermique, ce ratio n'est que de 20 à 25%.

Il n'empêche, la demande, très forte, risque de dépasser l'offre puisque pour satisfaire aux besoins de recharge d'un million de voitures électriques, il faut environ 1 gigawatt (GW) de puissance électrique installée. C'est globalement l'équivalent de la puissance d'un réacteur nucléaire. Sachant qu'il circule en France, quelque 38 millions de véhicules particuliers, cela donne une idée de la puissance qui reste à installer dans les années à venir si l'on s'oriente vers un parc automobile totalement électrique dans notre pays qui dispose actuellement d'une puissance nucléaire installée d'environ 60 GW...

... et que les technologies de l'information consommeront, selon les scientifiques, d'ici 2030, 21 % de l'électricité produite dans le monde (en 2021, ce taux est d'environ 7,5 %)... En effet, projetons-nous dans un avenir pas très éloigné : pour les professionnels du secteur de l'automobile et des nouvelles technologies, le véhicule électrique ne peut être considéré isolément, il n'est qu'une facette d'une « révolution » imminente, résumée par un acronyme à la mode : la voiture autonome et connectée ACES (*autonomous, connected, electric and shared-shared*, partagé). « Il ne fait plus de doute que le véhicule connecté, zéro émission [électrique] et 100 % autonome sera une réalité dans un horizon proche », affirme ainsi un regroupement d'entreprises... Ce qui entraînerait une augmentation de la consommation d'énergie induite par les *data centers*, les terminaux et les réseaux, de 9 % par an... malheureusement accompagnée d'une augmentation importante de production de CO<sub>2</sub> (Le Shift Project a montré que la part du numérique dans les émissions de CO<sub>2</sub> était déjà en 2018 de 3,7 %, soit plus que le transport aérien (2,5 %). « Tout le monde est d'accord sur le fait que **les véhicules autonomes seront très voraces en électricité** » (Reporterre 2021).

... sans oublier la prolifération prévisible des climatiseurs.

Apparemment, l'électrification à outrance, dans une société de surconsommation, au lieu de résoudre les problèmes, ne fait qu'en créer, en raison des effets rebonds. Cependant, il n'y a pas d'autre alternative.

L'électricité ne sera concurrencée que par la production de chaleur, qui pourrait atteindre tout de même une proportion non négligeable de l'énergie finale consommée (rappelons que les usages de la chaleur sont actuellement de l'ordre de 45 % de celle-ci).

Enfin, l'avantage de l'électricité est de produire bien moins de gaz à effet de serre que les énergies fossiles (pour autant qu'elle ait été produite de manière décarbonée).

Ceci dit, la grande question reste de savoir comment produire l'énorme quantité d'électricité qui sera nécessaire sans produire de gaz à effet de serre. Cette question sera évoquée dans le chapitre suivant.

Un autre problème va jalonner ce parcours incontournable. C'est celui des minéraux « critiques » indispensables qui accompagnent la production et l'utilisation de l'électricité : il serait souhaitable, pour assurer l'approvisionnement de l'Europe, et de la France en particulier (et ainsi diminuer le monopole de la Chine), d'ouvrir des mines en Europe. Compte tenu des graves inconvénients environnementaux que cela comporte (qu'on peut imposer sans trop de difficulté à des pays en voie de développement et en mal de démocratie), ça ne va pas être simple.

## 2 - Quelle transition énergétique ?

L'effort de clarification que nous venons de faire dans ce livre nous permet d'entrevoir des solutions durables et rationnelles dans la situation compliquée que nous vivons aujourd'hui. Le conflit ukrainien a par ailleurs permis de mettre en lumière les erreurs monumentales commises par la plupart des gouvernements dans le choix de leur politique énergétique.

On a vu que pour éviter un trop grand dérèglement climatique, il fallait abandonner les énergies fossiles (de toute façon, la quantité livrée dans le monde, entre autres en Europe, devrait diminuer inexorablement par suite d'épuisement progressif de ces ressources). On n'a donc pas le choix.

Pour y parvenir, on dispose d'un certain nombre de moyens, dont certains ne sont pas contestés et d'autres font l'objet de débats animés.

Les prises de position en la matière sont parfois étonnantes, par exemple celle qui consiste à vouloir abandonner tout à la fois l'énergie nucléaire et les énergies fossiles dans des délais très courts. Il est bon de rappeler que cet ensemble (fossiles et nucléaire), c'est actuellement près de 90 % de la consommation d'énergie finale en France et dans le monde. Leur mise à l'écart est si difficile à mettre en œuvre qu'on ne peut pratiquement pas l'envisager à l'échéance de ce 21<sup>ème</sup> siècle. Il y a beaucoup trop de contraintes et l'ampleur des transformations à mener est considérable. Aujourd'hui dans le monde, circulent 1,4 milliard de véhicules motorisés à quatre roues. Il devrait y en avoir 1,9 milliard en 2050. Dans le « meilleur » des scénarios, environ 600 millions d'entre eux seront alors propulsés par des moteurs électriques (Transitions et Energies n° 10).

Pour atteindre le zéro émission nette, il faudrait ramener la part des énergies fossiles dans le bouquet énergétique à 20 %. Au début des années 1990, elle était de l'ordre de 82 %. Au début des années 2000, elle était toujours de quelque 80 % ! C'est dire le chemin qui reste à parcourir.

Autre défi proposé par certains milieux écologistes : introduire dans le « mix » énergétique une très grande proportion d'énergies électriques intermittentes (éolien et solaire), pratiquement sans le concours de centrales d'« équilibre » (bannies, souvent, parce que fonctionnant aux énergies fossiles et fissiles) pour parer aux pannes de vent et de soleil. Cette proposition fait l'objet de débats tendus.

L'impatience est mauvaise conseillère. Nous sommes d'accord pour écarter les sources d'énergie polluantes, mais de manière progressive, sans compromettre la production d'énergie... Pour faire fonctionner l'industrie et les travaux publics, il faut des machines puissantes qui, aujourd'hui, fonctionnent la plupart du temps aux énergies fossiles.

Il conviendrait à notre avis, avant toute autre chose, de privilégier les sources d'énergie qui font quasiment l'unanimité et de voir comment et jusqu'à quel point on peut abandonner les autres. Il serait bon de raisonner de la manière suivante : aussi longtemps que nous ne disposerons pas de moyens de production d'énergie fiables, assurant la sécurité électrique, gardons les moyens actuellement largement dominants le temps qu'il faudra. Il ne sert à rien de détruire l'ancienne économie avant d'avoir construit la nouvelle, au contraire, on risque ainsi de ne rien construire du tout.



## De quoi disposons-nous en fait pour prendre le relais des sources fossiles et éventuellement du nucléaire ?

**De nombreux écologistes proposent les EnR intermittentes.** C'est une solution médiocre.

Entre autres, la **puissance produite par l'éolien fluctue considérablement** : elle peut être aussi faible que 1 % de sa puissance installée (nominale) totale. Elle coïncide donc rarement avec la puissance consommée. Pour assurer la stabilité et la sécurité du réseau électrique, il faut la mixer avec celle de centrales pilotables. Accroître le nombre des éoliennes n'est en rien une solution à l'intermittence, mais une source de difficultés croissantes dans la gestion du mix électrique.

**Seul le solaire pourrait être utile.**

**Le solaire photovoltaïque**, c'est-à-dire la production d'électricité à partir de panneaux solaires, est critiqué aussi, à juste raison, en raison de son intermittence. Cependant, il a **plus d'arguments en sa faveur**, à cause de la plus grande variété de ses usages possibles, de ses possibilités d'améliorations plus importantes, de ses inconvénients moindres pour ses riverains et surtout de ses possibilités non négligeables dans des pays plus ensoleillés que les nôtres.

Il devrait permettre par son utilisation croissante en autoconsommation sur toitures, de réduire les besoins de fourniture d'électricité sur le réseau national. C'est un avantage certain. De plus, de grandes avancées technologiques sont en cours. Le photovoltaïque permet de satisfaire un très grand nombre de besoins, dont, par exemple, les besoins domestiques, et la recharge des batteries dans le cadre de la mobilité électrique, à condition, bien entendu, qu'on puisse fabriquer, sur la durée, les batteries nécessaires. Il reste que les progrès du photovoltaïque ne sont pas aussi rapides qu'on pouvait l'espérer.

## Dans ces conditions, sur quoi peut-on compter ?

### Les économies d'énergie : La sobriété et l'efficacité énergétiques

**L'efficacité énergétique.** D'une manière générale, elle se définit comme la capacité à atteindre un indice de développement donné pour une dépense énergétique minimale. C'est une préoccupation constante dans notre société et dans notre système de production. Des centaines de milliards sont investis chaque année à cet effet dans le monde. Et effectivement, cela a permis de diminuer sensiblement la dépense énergétique. Toutefois, selon l'AIE (Agence internationale de l'Energie), cet effort, qui est ce qu'on peut faire de mieux pour empêcher la progression du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, n'est pas suffisant. Il faudrait en doubler le financement.

Quant à la **sobriété énergétique**, qui consiste à consommer moins par choix (de nourriture, de Data, d'objets manufacturés,...), elle peut permettre de gagner des points, mais c'est une solution qui fait penser à la décroissance, qui demande des efforts individuels et qui, pour cette raison, est d'une portée limitée. Il n'y a pas de miracle à attendre dans ce domaine. La hausse des prix semble, malheureusement, être le moyen le plus efficace limiter la consommation d'énergie.

## **Les solutions chaleur : la chaleur renouvelable.**

On l'a dit et répété : les usages de la chaleur, entre autres pour le chauffage des locaux du résidentiel et du tertiaire, représentent près de la moitié de la consommation finale d'énergie. Plutôt que d'utiliser des énergies fossiles (actuellement, plus de 60 % pour le chauffage), on peut recourir aux solutions renouvelables, dont toutes les formes de géothermie. Cette ressource, qui permet de produire de la chaleur, mais aussi de l'électricité de manière durable, et qui est à proximité, sous notre propre sol ou sous-sol, est pourtant négligée à tous les niveaux des pouvoirs publics. La PPE française n'en prend guère le chemin (Le soutien des pouvoirs publics aux filières de chaleur était en 2016 de 8 fois inférieur à celui consacré aux EnR électriques).

**La création et le renforcement de réseaux de chaleur** devraient être une priorité : on l'a vu, la chaleur récupérée ou produite soit par **la géothermie de proximité, avec le concours de pompes à chaleur ou non**, soit par le **solaire thermique**, peut être utilisée afin de chauffer les logements, les bâtiments publics et privés et leur fournir l'eau chaude sanitaire. Comme les usages de la chaleur représentent près de la moitié de la consommation finale d'énergie, on voit qu'il y a là de bonnes possibilités de réduire l'utilisation d'énergie fossile. La marge de progression est énorme. Contrairement à l'électricité, la chaleur est stockable, même sur la durée. C'est une voie à approfondir, la production d'énergies renouvelables thermiques devrait être préférentiellement développée, car plus efficace que les EnR électriques.

**La géothermie** (profonde) permet aussi de produire de l'électricité. Pour cela, il est nécessaire de creuser plus profondément (plusieurs kilomètres), mais pourquoi pas ? C'est une technologie connue, couramment utilisée pour des forages d'exploration pétrolière, dont certains, abandonnés, pourraient être réutilisés en géothermie profonde. Cette recherche doit être amplifiée (d'autant plus qu'on connaît déjà les zones géologiques propices).

**L'hydraulique**, très fiable, mais qui ne peut plus guère être développée en France, à l'exception peut-être du petit hydraulique (dont des petits barrages au fil de l'eau).

**La biomasse** : Si c'est fait convenablement et proprement, de manière durable, on peut espérer la faire contribuer aux objectifs de lutte contre le réchauffement climatique.

**Toutes ces solutions** devraient permettre de faire un bon bout de chemin, mais **pourraient ne pas suffire**, car les transports, l'industrie et l'agriculture, qui aujourd'hui, consomment les deux tiers de l'énergie finale, fonctionnent essentiellement avec des énergies fossiles (produits pétroliers et gaz). C'est énorme et ça ne se remplace pas très facilement.

Concernant les transports, **la solution qui a été retenue par les gouvernements est la mobilité électrique : l'électricité devrait remplacer l'essence et le diesel, stockée dans des batteries ou des piles à combustible**, mais cela n'est pas sans poser de multiples problèmes : le coût des batteries ne devrait pas s'améliorer rapidement, la fiabilité des véhicules qui les utilisent reste et restera un bon moment encore insuffisante. On peut s'attendre à ce que le parc de véhicules électriques ne se développe que fort lentement. Quant aux **véhicules à hydrogène**, la solution ne sera pas retenue à grande échelle à cause du coût très élevé de production de l'hydrogène « vert », (mais aussi de stockage, et de transport). Cependant, en dépit de son coût élevé, pour les transports de poids lourds et maritimes pour lesquels une solution à batteries ne sera probablement jamais possible, du moins pour les longues distances, la solution hydrogène pourrait être retenue.

Pour se faire une idée du temps qu'il faudrait pour mettre en place la mobilité hydrogène, il est bon de savoir que l'Union européenne s'est donné comme objectif d'avoir 100.000 camions fonctionnant à l'hydrogène sur les routes d'ici 2030. Au regard des trois millions de camions qui circulent en Europe continentale, cela peut sembler modeste. Mais pour alimenter en hydrogène vert 100.000 camions, il faudrait produire plus de 92 térawatt-heures d'électricité décarbonée, l'équivalent de 15 réacteurs nucléaires ou de 910 kilomètres carrés de panneaux solaires (Transitions et Energies n° 10).

Apparemment donc, **on s'oriente vers le tout électrique**, ce qui ne laisse pas de poser de multiples questions : celle de l'activité minière, pour les batteries, dont les effets sur l'environnement annihilent pratiquement les gains en CO2 gagnés dans la mobilité électrique, celle des ressources en métaux (terres rares, nickel, cobalt,... et surtout cuivre). Et par ailleurs, pour que la mobilité électrique puisse se développer, il faudra nécessairement produire davantage d'électricité et être en mesure de la stocker à grande échelle, ce qui ne sera pas possible avant longtemps....

Au sujet de l'hydrogène, il existe deux écueils : d'une part, il est très inflammable et explosif, d'autre part, il est un puissant gaz à effet de serre, lorsqu'il fuit dans l'atmosphère (ce qui se produit aisément, l'hydrogène étant la plus petite des molécules gazeuses, les risques de fuites sont plus importants qu'avec n'importe quel autre gaz). Il prolonge la durée de vie dans l'atmosphère du méthane, dont on sait que le potentiel de réchauffement global est élevé, et il participe à la formation d'ozone et de vapeur d'eau dans la troposphère.

### **Récapitulons :**

On ne peut guère compter sur les EnR intermittentes. Les EnR pilotables permettront de faire un bon bout de chemin si elles sont bien exploitées, mais pourraient aussi ne pas suffire à la demande. On ne peut pas le savoir puisque les pouvoirs publics privilégient les solutions intermittentes et que de ce fait les pilotables ne font pas l'objet d'études prospectives et sont insuffisamment développés.

**De ce fait, des discussions, vives parfois, ont lieu sur l'opportunité de conserver l'énergie nucléaire** (qui représente 12% de l'énergie mondiale), voire de la développer. Ce débat est planétaire. En Europe, on l'a vu, plusieurs pays ont décidé de l'abandonner. La difficulté est que, pour maintenir la production d'électricité à un niveau suffisant pour assurer la sécurité électrique, il faudra toujours avoir recours à des centrales au charbon ou à gaz, qui sont polluantes et productrices de CO2. C'est le serpent qui se mord la queue.

Beaucoup d'autres pays ont décidé de maintenir la production d'électricité nucléaire, non seulement en entretenant les centrales en activité, mais encore en construisant de nouvelles, surtout vers l'Est et le nord de l'Europe.

### **Faut-il rejeter le nucléaire avant d'avoir trouvé d'autres solutions ?**

C'est une énergie dense, pas très chère, et surtout pilotable et décarbonée (donc bonne pour le climat !). Mais les risques sont loin d'être négligeables, d'où des débats vifs et nourris.

La question des risques se situe à deux niveaux : le danger qu'il représente et l'existence de déchets radioactifs difficiles à traiter, à éliminer. Certes, les accidents du nucléaire sont spectaculaires. Mais le danger n'en est pas moins surestimé. Par exemple, sait-on que l'utilisation du charbon ferait à l'échelle mondiale environ 1100 fois plus de morts que le nucléaire pour une même quantité d'électricité produite (étude de James Conca, 2018) ?

Nous ajouterons comme Jean-Marc Jancovici (13 décembre 2019 dans Le Figaro) :

*« Le nucléaire fait partie des canots de sauvetage. À partir du moment où le navire principal -les fossiles- prend l'eau, et que vous devez le saborder aussi vite que possible pour des raisons climatiques, il vous reste les canots de sauvetage: les économies d'énergie, les énergies renouvelables et le nucléaire. Les militants qui s'opposent au nucléaire disent en fait «je ne veux pas utiliser un des canots de sauvetage car le gouvernail pourrait grincer». Ça ne fait pas baisser le risque global, ça l'augmente! »*

Le nucléaire pourrait être plus fiable, mais à condition qu'on s'oriente vers des filières et les solutions techniques prometteuses, très peu ou pas exploitées, comme :

- le nucléaire de 4<sup>ème</sup> génération, les réacteurs à neutrons rapides (par opposition aux réacteurs actuels qui sont à neutrons thermiques).
- l'utilisation de la chaleur perdue,
- les réacteurs utilisant le thorium 232
- et les SMR (Small Modular Reactors).

Les réacteurs à neutrons rapides sont refroidis au sodium. Ils rendent possible l'utilisation de l'uranium 238, bien plus abondant que l'uranium 235 actuellement utilisé pour produire l'énergie. Ils permettraient le recyclage à l'infini de nos stocks de combustible nucléaire, car ils utilisent l'essentiel de l'uranium. C'est la filière la plus durable.

Quant aux Small Modular reactors (petits réacteurs modulaires), comme il en existe déjà sur des sous-marins et des porte-avions, ainsi que sur des brise-glace russes en Arctique, ils sont plus faciles à construire en série, donc moins coûteux par MW de puissance que les puissants réacteurs actuels... et beaucoup plus sûrs.

Notons au passage que la France dans sa volonté de renouer avec le nucléaire, annoncée à Belfort le 10 février 2022 (14 nouveaux réacteurs EPR devraient être construits dans les trente prochaines années), sans prévoir une transition vers la quatrième génération, n'a pas forcément choisi la meilleure des solutions.

Mais une perspective intéressante est aussi celle du **réacteur à fusion** : cette possibilité est en cours d'expérimentation, avec un financement international, le projet international « ITER », à St Paul-les-Durance en Provence.

Il s'agit de reproduire les réactions de fusion de l'hydrogène qui se déroulent au cœur du soleil et des étoiles et de démontrer que ces réactions peuvent être exploitées pour produire une énergie sûre, virtuellement inépuisable et respectueuse de l'environnement. Un réacteur à fusion, dénommé TOKAMAK, produisant 10 fois plus d'énergie qu'il n'en consommera, qui confinerà grâce à de puissants champs magnétiques un plasma chauffé à 150 millions de degrés, sera capable de produire une énergie presque sans limite, les particules énergétiques s'entretenant d'elles-mêmes, sans la moindre émission de gaz à effet de serre et sans déchets radioactifs.

C'est donc une future énergie renouvelable, inépuisable, qui serait extrêmement efficace, permettant de lutter contre le réchauffement climatique à grande échelle, tout en fournissant théoriquement l'énergie nécessaire pour toute la planète. On prévoit les premiers prototypes industriels vers le milieu du XXI<sup>ème</sup> siècle (2040-2045) et l'énergie de fusion alimentant le réseau électrique mondial en 2060.

Cependant, des start-up, aux USA (le MIT) et en Grande-Bretagne, en Corée du Sud et en Chine, sont en train de mettre en place des réacteurs à fusion, de dimension plus modeste, mais orientés vers une production d'électricité commercialisable beaucoup plus rapidement. Elles sont déjà plus de 20 dans le monde à s'être lancées dans cette aventure. C'est, peut-on penser, que les chances de succès ne sont pas négligeables. Affaire à suivre. Mais Il n'est pas certain que cette solution qui reste à l'état d'expérimentation, arrive assez tôt pour résoudre nos problèmes climatiques"

En attendant cette perspective, donnons déjà la préférence aux énergies renouvelables pilotables actuellement opérationnelles, soit : pour l'électricité : l'hydroélectricité (peu de possibilités supplémentaires restent en France), la géothermie, et pour la chaleur renouvelable : la récupération des chaleurs perdues, ainsi que le solaire thermique et la géothermie de proximité, à développer à bien plus grande échelle, sans limitation, et dont il faudrait doubler, voire tripler les subventions pour « faire le break » dans la décarbonation des bâtiments.

#### **Un mot pour terminer, sur les décisions prises actuellement et les débats en cours.**

*« Sans se concerter, tous les pays européens ou presque ont adopté la même stratégie. Elle consiste à remplacer des moyens de production d'électricité dits pilotables par des renouvelables intermittents et aléatoires. De ce fait, selon une étude très récente et alarmiste, France Stratégie estime que dès 2030 et sans doute même avant, le réseau électrique européen «ne pourra plus faire face à toutes les demandes de pointe moyenne». En clair, les pénuries et les coupures seront fréquentes.*

En Europe, 110 GW de puissance pilotable devraient être retirés du réseau européen d'ici 2030-2035, en particulier de nucléaire. Dans le même temps, les capacités installées en EnRi (Energies renouvelables intermittentes) deviendront très importantes. Avec environ 400 GW, elles devraient dépasser peu après 2025 celles des moyens conventionnels (grand hydraulique inclus). Mais 1 GW d'ENRi n'a en fait rien à voir avec 1 GW de puissance pilotable, car sa capacité à être mobilisé lors des situations de tension du système électrique n'est pas du tout garantie.

Cette tendance qui consiste à vouloir se débarrasser tout à la fois du nucléaire et des sources d'énergie fossiles, nous la devons à l'écologie politique diffusée par des partis et des ONG très efficaces dans leur communication. Elle part de bons sentiments, mais est plutôt irréaliste. Est-ce qu'on a les moyens de se passer des deux à la fois? C'est un objectif qui est du domaine du rêve, absolument impossible à tenir dans de brefs délais.

Le principe de réalité veut que nous n'ayons pas aujourd'hui les moyens économiques, ni technologiques, ni politiques de nous passer des énergies fossiles et fissiles dans un avenir proche. Cela ne veut pas dire qu'il ne faut pas tendre vers leur suppression, mais il est indispensable de continuer à faire face aux besoins de production et de mobilité tels qu'ils existent actuellement, faute de quoi la mise en place des énergies renouvelables elles-mêmes serait compromise.

Comment chauffer en hiver des centaines de millions de logements? Comment produire par an 1,6 milliard de tonnes d'acier, 4,6 milliards de tonnes de ciment et 180 millions de tonnes d'ammoniac? L'industrie n'a pas aujourd'hui de solutions réalistes et viables et n'en aura pas, au mieux, avant dix à quinze ans. Nous n'avons pas aujourd'hui de technologies pour remplacer les carburants fossiles dans le transport maritime, ni dans le transport aérien...

## Que faire donc ?

Jean-Marc Jancovici : « *D'abord, je dirais, passer du temps à bien comprendre le problème ! Ensuite, arrêter demain matin le soutien au solaire et à l'éolien et réorienter les quelques milliards d'euros qui y sont consacrés chaque année dans des mesures vraiment efficaces : aider les ménages modestes à passer à la pompe à chaleur, à isoler, à acquérir des voitures consommant très peu tout en obligeant les constructeurs à en faire, à faire des pistes cyclables et de l'agriculture moins émissive, etc.* »

C'est, pensons-nous, la voie de la sagesse.

Ce livre qui peut intéresser les spécialistes, est surtout destiné au grand public. Celui-ci, submergé d'informations contradictoires sur la question de l'énergie, a bien besoin d'une clarification exempte de parti-pris.

L'objectif de l'ouvrage, précisément, est faire le point sur toutes les questions qui se posent sur les énergies renouvelables, mais pas seulement : si pour le climat, il faut abandonner les énergies fossiles productrices de gaz à effet de serre (actuellement largement dominantes), comment peut-on s'en sortir ? En utilisant de plus en plus d'énergies renouvelables intermittentes ? Ou de nucléaire ? Cette question cruciale ne reçoit pas la même réponse de tous ceux qui émettent des opinions sur les options possibles. Au contraire, c'est plutôt cacophonique. Dans ce contexte, il était important de faire l'analyse de chacune des sources et des vecteurs d'énergie renouvelables la plus complète, la plus objective et la plus honnête possible et c'est ce à quoi nous nous sommes attachés, après quoi il était possible de faire le point sur les possibilités de se sortir de la crise de l'énergie que subit actuellement l'humanité.

Cette démarche nous a permis à nous-mêmes, rédacteurs de ce livre, de beaucoup apprendre, et c'était passionnant. Nous espérons que les lecteurs, dont nous espérons éveiller la curiosité, nous suivront et s'informeront régulièrement sur l'évolution de cette question.

**Le Collectif régional " Toutes Nos Energies / Occitanie Environnement "** rassemble 120 fédérations départementales, collectifs et associations, œuvrant pour la protection de l'environnement, du patrimoine et de la qualité de vie des habitants et, à ce titre, opposés, à l'invasion de l'industrie éolienne dans les espaces ruraux de la région Occitanie.

Il s'est donné pour buts de soutenir l'action des associations locales et d'être un interlocuteur crédible des acteurs régionaux et des autorités, **pour une politique énergétique respectueuse du vivant et des territoires ruraux d'Occitanie.**

En démocratie, les pouvoirs politiques et économiques ne devraient pas imposer leurs règles sans réel débat citoyen ; les citoyens doivent reprendre la parole et participer en amont, à l'élaboration des projets ayant un impact sur l'environnement ; les habitants, attachés aux territoires ruraux et hyper-ruraux, veulent que leurs enjeux spécifiques soient compris et valorisés.

**Pour plus d'informations : [toutesnosenergies.fr](http://toutesnosenergies.fr)**

**Le Collectif pour la Protection des Paysages et de la Biodiversité 34-12** est membre du collectif régional " Toutes Nos Energies/Occitanie Environnement, de la fédération " Vent de Colère " et de la FED (Fédération Environnement Durable).

Il est composé de 50 associations de l'Hérault et du Sud Aveyron, associations de protection des paysages et du patrimoine bâti, de préservation de la biodiversité qui ont décidé de s'unir pour la défense active de la qualité de vie et de la santé des riverains, du patrimoine culturel et paysager, du tourisme, de la faune et de la flore particulièrement riches de la région Occitane.

VPPN, (Vigilance, Patrimoine Paysager et Naturel) son comité qui soutient le collectif financièrement et juridiquement, est une association collégiale et apolitique. Elle s'est dotée de deux commissions : " Biodiversité " et aussi " Energies renouvelables " pour mettre en avant ses orientations au sujet de la

**Contact : [aigles-escandorgue@gmail.com](mailto:aigles-escandorgue@gmail.com)**