

### 3 Production de l'énergie électrique

A l'heure du réchauffement climatique on continue contre toute attente de produire l'électricité avec le nucléaire et la combustion du pétrole, deux chaînes énergétiques qui passent par le chaud pour assurer notre besoin. Les tensions géopolitiques résultant d'un pétrole devenant plus rare et la transition énergétique vers les énergies renouvelables qui en résulte vont créer une dépendance de l'Europe vis-à-vis des pays producteurs de métaux rares nécessaires à la mise en œuvre des nouvelles technologies qui vont assurer nos besoins énergétiques. La transition, passant par l'abandon des produits fossiles, va créer une dépendance des pays aux métaux et aux terres rares comme cela est évoqué à la page 106 du fichier [cartographie.pdf](#). La décarbonation de l'industrie par abandon de la combustion décidée lors de la COP28 ne devra pas être entaché par l'introduction du nucléaire sur la chaîne internationale. D'une part le nucléaire n'a pas, on va le voir, le potentiel requis permettant d'assurer internationalement le besoin bien longtemps et il ne faut pas aussi perdre de vue que la chaîne énergétique consistant à produire l'électricité avec le nucléaire génère en pure perte en réchauffant notre atmosphère une quantité d'énergie thermique sensiblement 2 fois plus importante que l'énergie électrique produite. Afin de ne pas mettre la charrue avant les bœufs nous allons examiner au préalable les chaînes énergétiques que nous sommes progressivement en train d'abandonner.

#### Les plus mauvaises chaînes

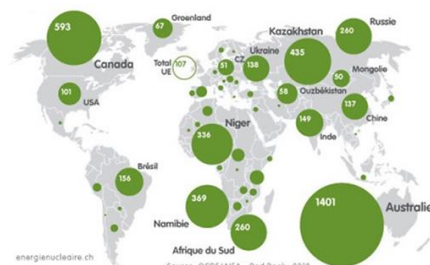
#### 31 Le nucléaire



[La production de l'électricité à partir du nucléaire civil](#), technologie complexe, coûteuse et lente à mettre en œuvre et qui plus est dangereuse a cependant été initiée par le général de Gaulle à la fin de la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale. Les nucléaires civil et militaire ne sauveront pas le climat, pire ils condamnent la planète (lire [l'industrie du mensonge](#)). A l'heure du réchauffement climatique évitons de développer une chaîne énergétique telle que le nucléaire passant par les hautes températures et perdant dans l'environnement en le réchauffant une quantité d'énergie thermique sensiblement deux fois supérieure à l'énergie électrique produite. Cet important dégagement thermique vient appuyer la thèse de Hervé Kempf selon laquelle le nucléaire n'est pas la solution et le fait qu'il va falloir orienter nos actions vers la sobriété énergétique. Quant à l'Allemagne, sa puissance industrielle est là mais 80 % de son habitat étant chauffé par du gaz russe à l'heure du conflit qui nous oppose à la Russie, notre voisin ne pouvant à l'évidence commuter brutalement vers le renouvelable local a choisi le court terme le charbon associé à ce qui pourrait être la moins mauvaise des solutions : le gaz de schiste d'origine nord-américain et le transport par méthanier. La France quant à elle, a choisi le long terme et ce qui pourrait être la pire des solutions, le gâchis de l'effet joule et le nucléaire.

#### La fission

On pourrait croire que les [réserves mondiales d'uranium](#) situés exclusivement sur l'immense territoire russe sont, comme le charbon, importantes. Dans la pratique, il n'en est rien, l'uranium comme le pétrole est loin d'être inépuisable. Compte tenu de la population mondiale actuelle de 8 milliards d'Homo sapiens, si tous les pays du monde consommaient autant d'uranium que la France, à savoir environ 9500 tonnes pour 60 millions d'habitants, il n'y en aurait pas pour bien longtemps. La décision prise par notre président de persévérer avec la production d'énergie électrique d'origine nucléaire ne va pas dans le bon sens vu que si tous les pays du monde prenaient exemple sur la France, les réserves mondiales en uranium situées sur le territoire russe ne nous mèneraient pas bien loin.



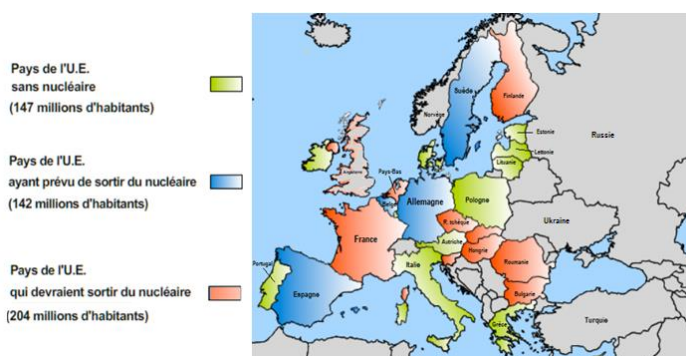
Réserves mondiales d'uranium en 2017 millions de t

	Consommation	Réserves
USA	19000	Australie 1400000
France	9500	Canada 593000
Chine	8290	Kazakhstan 435000
Russie	5380	Nambie 369000
Corée du sud	4730	Niger 336000
Ukraine	1940	Russie 260000
Royaume-Uni	1770	Afrique du sud 260000
Canada	1590	Brazil 156000
Allemagne	1480	Indes 149000
Espagne	1280	Chine 137000
	54 960 tonnes	4 095 000 tonnes

Quant au prix de revient de l'énergie électrique d'origine nucléaire, il va en effet devenir important en raison de la complexité de la chaîne de production et du coût de sa sécurisation avec qui plus est, le fait que le nucléaire civil est un tremplin vers le militaire. La consommation annuelle d'uranium pour un réacteur de 1 000 MW produisant environ 7 TWh/an s'il est 20 % du temps à l'arrêt pour entretien étant voisine de 150 tonnes et vu qu'il y a une cinquantaine de réacteurs de ce type en fonctionnement dans l'hexagone, si tous les pays imitaient la France la consommation mondiale d'uranium serait égale à  $[(150 \times 50) / 60] \times 8 000 =$  un million de tonnes et il y en aurait pour environ 4 ans vu les réserves mondiales de 4 095 000 tonnes ou pour être prudent pour 10 ans si l'on tient compte que les réserves naturelles sont souvent sous-estimées. La Suède, qui exerce la présidence du Conseil de l'union Européenne pendant le premier semestre de 2023, considère avec justesse que le gouvernement français a tort de comptabiliser l'hydrogène fabriqué avec l'électricité d'origine nucléaire comme étant d'origine renouvelable.

Il nous faudra aussi considérer que la Russie étant le seul pays au monde capable de recycler l'uranium utilisé dans la vingtaine de réacteurs encore en fonctionnement en France que le conflit entre la Russie et l'occident n'arrange pas les choses. On pourrait aussi être tenter de dire qu'utiliser une chaîne énergétique passant par les hautes températures en réchauffant notre environnement et en perdant sensiblement dans l'atmosphère deux fois plus d'énergie sous forme thermique que d'énergie électrique produite n'est pas très intelligent. Certains diront avec raison que les quantités d'énergie thermiques perdues dans l'atmosphère sont bien faibles comparativement à l'énergie qui nous vient du soleil mais il nous faudra bien considérer le fait que nous ne pourrions pas généraliser mondialement la production d'électricité avec la fission nucléaire en raison du coût élevé de l'électricité qu'elle génère. Qui plus est, la dangerosité des déchets radioactifs sur le long terme et celle du couple civil-militaire en cas de guerre comme cela est actuellement le cas en Ukraine pourrait bien condamner cette chaîne énergétique complexe avec des coûts du kWh évoluant vers le haut alors que celui des renouvelables évolue à la baisse (voir page 113 du chap.7) avec un potentiel important grâce au rayonnement solaire de 390 watt /m<sup>2</sup> et à la surface de notre planète (terre + océans) proche de 500 millions de km<sup>2</sup> alors qu'une infime partie de cette surface serait suffisante pour assurer notre besoin en électricité.

*La péninsule ibérique constituée de l'Espagne et du Portugal, favorisée par un bon ensoleillement, produit une grande part de son électricité par des sources renouvelables locales au faible coût marginal. Moins ensoleillée, la Pologne a choisi le groupe américain Westinghouse et un réacteur nucléaire à eau pressurisée de 3<sup>ème</sup> génération plutôt que le français EDF pour sa première centrale nucléaire. Le réacteur AP1000 de la compagnie américaine Westinghouse choisie par la Pologne n'est peut-être pas très performant avec sa puissance thermique perdue voisine de 3 200 MWth pour 1 154 MWe mais il est plus compact et plus simple de mise en œuvre avec moins de tuyaux, de vannes, de pompes, de béton et de ferraille donc moins coûteux que celui de Flamanville.*



*A l'exemple de l'Allemagne et de l'Espagne et malgré le risque engendré par la situation en Ukraine, la Belgique, fidèle à sa décision de 2003 d'abandonner le nucléaire met à l'arrêt après 40 ans de fonctionnement le réacteur n° 3 de la centrale nucléaire de Doel qui va être suivi d'une longue phase de démantèlement.*

En 2018, plus de la moitié de la consommation mondiale annuelle d'électricité dans le monde a été celle de 3 pays : la Chine (6 880 TWh), les États-Unis (4 288 TWh) et l'Inde (1 309 TWh). Ceci principalement avec la combustion du charbon et les réserves d'uranium très excentrées par rapport aux pays consommateurs et localisées principalement en Australie, Canada, Kazakhstan, Namibie, Niger, Afrique du Sud et Russie. Mais est vrai que transporter l'équivalent énergétique de 1 m<sup>3</sup> de pétrole c'est 1 mm<sup>3</sup> d'uranium 235. La dépendance de l'Europe à la Russie n'est pas seulement celle du gaz, c'est aussi celle du retraitement de l'uranium de nos centrales nucléaires par la seule usine au monde située en Russie.

## *La fusion*

Il y a une quinzaine d'années, lorsque la décision a été prise d'installer en France, à Cadarache, le réacteur expérimental ITER basé sur la fusion nucléaire pour assurer notre approvisionnement en énergie, le responsable du CNRS de l'époque avait donné sa démission estimant ce projet trop complexe et vu l'urgence qu'il y a à agir sujet à une issue trop incertaine. À l'aube du réchauffement climatique toutes ces chaînes énergétiques passant par les très hautes températures pour tenter de résoudre nos problèmes d'énergie me font [froid dans le dos](#). Et ceci même si nous arrivions à confiner magnétiquement la chaleur. De plus, prétendre comme *GoodPlanet* que le numérique pourrait aider à contrôler les instabilités de la fusion nucléaire ne me semble pas très raisonnable en ce qui concerne la sécurité et persister à l'heure du réchauffement climatique avec les chaînes énergétiques actuelles passant par les hautes températures telles que la combustion des produits fossiles ou le nucléaire me semble contraire au bon sens. Vu le coût élevé de l'électricité qu'elles génèrent on peut parler de mesure antisociale qui passe, facteur aggravant, sous silence la dangerosité du nucléaire en raison de la radioactivité. Le « moins pire » serait que les pays européens encore attachés au nucléaire (en rouge) et qui estiment malgré la complexité de la chaîne énergétique et les contraintes qui lui sont associées qu'il ne faut pas mettre tous les œufs dans le même panier abandonnent les réacteurs type EPR pour utiliser des réacteurs à neutrons rapides à sels fondus. Cela compte tenu du fait que si les contraintes imposées par les hautes températures avec 700 degrés centigrades (973 °K) à la source chaude et 100 degrés (373 °K) à la source froide sont bien là, elles ne sont pas aggravées par des contraintes mécaniques, cette chaîne énergétique présentant l'avantage de fonctionner à basse pression et de diminuer les contraintes mécaniques dans l'enveloppe du réacteur. Si cette technologie moins redoutable en ce qui concerne la radioactivité que le nucléaire actuel devait prendre place en Europe, elle devrait être limitée en volume à parts sensiblement égales avec l'hydrogène, les STEP et les piles pour satisfaire l'intermittence hivernale du voltaïque associé à l'éolien vu qu'il y aurait tout de même des problèmes métallurgiques à résoudre. Quant au gaz naturel qui émet moins de gaz carbonique dans l'atmosphère que le fioul ou l'essence, la décision de le conserver ne peut se justifier que le temps de mettre en place les nouveaux dispositifs de stockage de l'électricité. Le Lutin thermique que je suis approuve *Yannick Jadot* ainsi que *Greenpeace* qui appellent à une transition énergétique sans nucléaire pour produire l'électricité et leur donne raison concernant la dangerosité des réacteurs et le fait que le nucléaire "ne sauvera assurément pas le climat". Il les approuve à propos du risque de prolifération de la radioactivité en raison de la production des déchets radioactifs. Vu l'urgence qu'il y a à agir dans le bon sens, Yannick Jadot a eu raison de critiquer Nicolas Hulot sur son report dans le temps de l'objectif de baisse à 50 % du nucléaire dans le mix électrique. Il a de plus eu raison, selon moi, d'estimer qu'il faut « mettre le paquet sur les énergies renouvelables » pour améliorer nos conditions sociales vu que l'électricité associée au trio voltaïque-éolien-hydrogène est certainement moins chère que celle du nucléaire. Assurer la sécurité avec un mode de production de l'énergie électrique type EPR va en effet obliger les acteurs de cette chaîne énergétique à vendre l'électricité à l'utilisateur à un prix socialement inabordable. La sécurité et la correction des défauts de fabrication comme les soudures sur le couvercle supérieur du réacteur de l'EPR de Flamanville peut par la suite coûter très cher. Le déséquilibre de prix par rapport à l'énergie électrique solaire et son stockage grâce à l'hydrogène, aux piles, et aux STEP pourrait bien compte tenu du passage par les hautes températures et ses conséquences en ce qui concerne le réchauffement climatique, condamner la fission nucléaire sur le moyen terme voire le court terme.

## *L'Europe et le nucléaire*

Y a-t-il eu en France un sondage de l'opinion publique et un temps de débat suffisamment long pour savoir si l'on doit évoluer ou non vers le nucléaire ? vu l'importance de la décision la réponse est assurément non. Lorsqu'il a annoncé le 20 février 2022 qu'il envisageait de relancer le nucléaire dans notre pays avec 6 voire 14 centrales EPR en négligeant le soleil, notre président a je pense, compte tenu de la faible potentialité de l'uranium dans le monde, montré aux autres pays européens et au monde l'exemple de ce qu'il ne faut pas faire. Quitte à passer pour un dissident, je dirais que la commission européenne, qui vient malgré les protestations justifiées de nombreuses ONG d'accorder un label « vert » au nucléaire a assurément été influencée par la présidence française. Quant à nos voisins les anglais, qui donnent le mauvais exemple en décidant de persévérer avec les produits fossiles, cela ne change pas grand-chose mondialement parlant vu que la population de ce pays ne représente qu'environ deux % de la population indienne et chinoise réunis, fortement ancrée on le sait vers le charbon. Ceci dit, la France qui persévère à vouloir produire son électricité avec le nucléaire, une chaîne énergétique qui passe par les hautes températures en dissipant dans notre environnement une quantité d'énergie thermique sensiblement deux fois supérieure à l'énergie électrique produite ne vaut guère mieux.

## L'EDF et le nucléaire

En France, 80 % de notre électricité était produite par des réacteurs alimentés en uranium pilotables de +/-30 % en une ½ heure ce qui permettait d'être en adéquation avec la demande du réseau selon un rapport concernant l'énergie établi par l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) dépendant de l'OCDE. Ce rapport appuyé par le président de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) ainsi que par une association de polytechniciens regroupée sous le sigle "Révolution énergétique" commence à faire autorité et vient au secours de la « Solar Water Economy » (SWE). Ceci en établissant que le besoin en énergie des Français peut être satisfait à 100 % par des chaînes énergétiques associées aux énergies renouvelables moins coûteuses et moins dangereuses que le nucléaire. Il n'est pas trop tard pour l'EDF, qui est tombé voilà quelques décennies dans le piège de l'effet Joule pour assurer le chauffage de l'habitat, de se ressaisir et de construire une solution européenne moins énergivore grâce à la "Solar Water Economy" capable d'assurer notre confort thermique en consommant moins grâce à l'eau et en produisant mieux grâce au soleil.

Un projet nommé Hercule a été mis en place en France par l'exécutif. Il consisterait à scinder EDF en trois parties :

- un premier pôle serait chargé de la production nucléaire et thermique (EDF bleu),
- un deuxième aurait la charge des concessions hydroélectriques (EDF Azur)
- un troisième (EDF vert) regrouperait tout le reste, notamment le solaire, l'éolien et la gestion des réseaux :

Il semble évident que pour former un système cohérent, ces 3 pôles - en supposant qu'ils prennent place - devront collaborer étroitement et bien évidemment ne pas entrer en concurrence les uns avec les autres. Les actions que vont devoir prendre chacune de ces trois parties sont en effet complémentaires et étroitement associés. Chacun de ces pôles devra en effet avoir conscience du rôle que l'on attend de lui :

- le premier prendre conscience qu'il faut remettre à sa place l'énergie thermique et abandonner l'effet Joule,
- le deuxième concentrer son action sur le stockage de masse de l'énergie électrique,
- le 3<sup>ème</sup> qui a vocation à devenir le pôle le plus important et le plus utile pour notre devenir énergétique compte tenu du fait que le prix de revient du kWh électrique renouvelable obtenu avec les nouvelles techniques évolue régulièrement à la baisse (voir page 113).

## La dangerosité du nucléaire

Il y a le faible risque qu'un groupe terroriste arrive à acquérir des matières fissiles telles que l'uranium 235 et produise une bombe mais pour l'essentiel la dangerosité du nucléaire est d'une part le modeste rendement de cette chaîne énergétique qui affecte encore un peu plus le réchauffement climatique et d'autre part le fait qu'en 1945, lorsque les Etats-Unis ont détruit les villes japonaises de Hiroshima et Nagasaki avec des bombes atomiques avec l'objectif de clore la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale, ils étaient la seule puissance nucléaire du monde à posséder ce type d'arme et ils ne pouvaient craindre la riposte. En 2023 le risque que les choses tournent mal est plus grand vu qu'une dizaine de pays possèdent maintenant l'arme nucléaire. Lors de la COP28, la moitié des pays dans le monde ont décidé avec bon sens de tripler leur production d'électricité avec les ENR. Revers de la médaille avec la France qui se rallie aux 20 pays qui s'engagent à poursuivre avec le nucléaire et qui montre, sous l'autorité de son président, [le mauvais exemple](#) en affirmant que le seul moyen de « sortir du charbon » est de rajouter le nucléaire eux ENR.



## Des déchets radioactifs

La Finlande est pour l'instant le seul pays à avoir construit dans le granit un site profond de stockage des dangereux déchets radioactifs devant la Suisse ainsi que la Suède qui envisagent de le faire également dans le granit. Le projet français Cigéo de Bure, qui envisage de le faire dans l'argile en remplacement du stockage actuel en surface est fortement contesté. Force est de constater que malgré la dangerosité des déchets radioactifs et après plus de soixante ans d'exploitation de l'énergie nucléaire en France, il n'existe toujours pas de solution durable et sûre de stockage dans notre pays. Selon l'organisme *Orano*, les déchets radioactifs « à vie longue » qui ne représentent que 10 % du stock total de déchets radioactifs concentrent 99,9 % de la radioactivité totale et demeurent actifs pendant plus de 300 ans voire des milliers d'années. Suite à la catastrophe de Fukushima au Japon il faut rappeler que la dangerosité du nucléaire est associée au risque sismique. Les réacteurs à neutrons rapides à sels fondus avec une durée de vie des déchets radioactifs limitée à une cinquantaine d'années, seraient une solution pour ce qui concerne la dangerosité. Ils seraient également une solution intéressante en termes de performance mais avec une température à la source chaude élevée voisine de 700 °C très contraignante en ce qui concerne les problèmes métallurgiques.

*La politique énergétique orientée vers le nucléaire de notre Président ne pourra pas remplacer la combustion.  
À cela une raison simple, la dépendance de nos réacteurs nucléaires à l'uranium enrichi russe.*

## *Du militaire*

Selon l'Institut international de recherche sur la paix de Stockholm, l'énorme arsenal nucléaire russe et américain constitué pendant la guerre froide a été divisé par plus de cinq depuis son record absolu de 1986. Avec plus de 70 000 têtes nucléaires, Moscou et Washington contrôlaient en effet à l'époque 90 % de l'armement nucléaire mondial. Les neuf nations dotées actuellement de « la bombe » (Russie, Etats-Unis, Royaume-Uni, France, Chine, Inde, Pakistan, Israël et Corée du Nord) ne détiendraient plus selon cet organisme "que" 12.705 têtes nucléaires. Avec la guerre en Ukraine on peut craindre que cette ère de désarmement dévoilée par le centre de recherche suédois ne cesse. Le nucléaire « militaire » et ses graves conséquences en ce qui concerne la sécurité est quoiqu'on en dise étroitement associé au nucléaire « civil » et ses centrales qui produisent de l'électricité. Un conflit nucléaire, même limité à l'Inde et au Pakistan entraînerait selon une étude de chercheurs américains, une réduction de 7 % des rendements agricoles mondiaux dans les 5 années suivant les explosions ce qui pourrait déboucher selon eux sur une famine provoquant la mort de 2 milliards d'individus. Le nouveau réacteur nucléaire français de Flamanville, qui va lui réchauffer la mer sous le contrôle de l'ASN est l'aboutissement du processus imaginé par les USA pour leurs réacteurs à eau pressurisée, le CEA ayant proposé des modifications en fonction des incidents. Pour la liste des accidents nucléaires par niveaux de gravité on peut se reporter à Wikipédia et à UNSCAR. Le réacteur de Tchernobyl était une unité soviétique difficile à piloter et l'accident a été traité à la soviétique. Quant aux réacteurs japonais de Fukushima à eau bouillante BWR, une vidéo de l'ASN explique le déroulement de l'accident, les difficultés, les erreurs et les conséquences. La dangerosité du nucléaire comme le rappelle *Mr Laponche* fondateur de l'Ademe depuis bien longtemps est double :

- celle du nucléaire civil en raison de la radioactivité des déchets et la difficulté de leur stockage
- celle du nucléaire militaire avec selon un institut international de recherche sur la paix basé à Stockholm : la Russie qui dispose de 6 255 tête nucléaires, les États-Unis de 5 550, contre 350 pour la Chine, près de 300 pour le parc français et une vingtaine de bombes atomiques pour l'arsenal nord-coréen.

Elle est même triple si l'on considère la Russie et l'Ukraine qui s'accusent mutuellement de bombarder la plus grande centrale nucléaire européenne de Zaporijia. Un conflit militaire comme celui entre l'Ukraine et la Russie accroît en effet singulièrement la dangerosité du nucléaire civil. On mesure cette dangerosité en observant que le dernier des 6 réacteurs encore en activité de la centrale nucléaire de Zaporijia a dû lui aussi être arrêté par l'opérateur ukrainien en septembre 2022. Ceci probablement sur les conseils de l'AIE alors qu'elle produisait selon cet opérateur l'électricité nécessaire au refroidissement du combustible nucléaire et à la sécurité du site. Cela n'enlève en rien la dangerosité du nucléaire mais notre président a raison de souligner que « l'occupation russe » de la plus grande centrale nucléaire européenne de Zaporijia est la cause des risques qui pèse sur cette centrale et la raison pour laquelle il a demandé qu'en soit retiré toutes les armes.

## *Un peu d'histoire*

La catastrophe nucléaire majeure de la centrale de Tchernobyl qui a explosée il y a plus de 50 ans en augmentant dangereusement la radioactivité en Europe a été provoquée par une gouvernance russe autoritaire et inadaptée du temps de la république socialiste soviétique d'Ukraine en URSS. Cette autorité excessive de la nation russe actuelle n'est pas totalement éteinte et atteint son point culminant avec l'invasion militaire de l'Ukraine sous l'autorité d'un président russe qui pourrait bien prochainement se trouver contraint de négocier pour éviter une guerre nucléaire. Homo sapiens qui a réussi en mer du Japon à vaincre la dangerosité naturelle du fugu un poisson délicieux qui contient pourtant un poison extrêmement puissant, la *tétrodotoxine*, qui paralyse les muscles et entraîne l'arrêt respiratoire de celui qui l'ingère parviendra-t-il à sortir de l'impasse que constitue la radioactivité du nucléaire ? Vu que les autorités japonaises ont donné leur feu vert pour rejeter progressivement dans l'océan Pacifique sous la supervision de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) plus d'un million de tonnes d'eau contaminée provenant de la centrale de Fukushima les capacités de stockage sur le site arrivant à saturation, il faut l'espérer.

## *Heureusement, le nucléaire c'est aussi :*

- Le scientifique avec l'étude des composants du noyau des atomes : CERN, CEA, CNRS
- La datation par la mesure de la décroissance dans le temps de la radioactivité (Carbone 14)
- Le médical : la radiothérapie avec la destruction ciblée des tumeurs cancéreuses
- Le contrôle non destructif : voir à l'intérieur de la matière
- La radioprotection qui détecte l'influence sur la santé des rayonnements ionisants : ASN et IRSN
- L'inquiétude générée en France par le projet européen Hercule à propos de l'EDF

*Les livres sur le nucléaire : stop ou encore ? d'Antoine de Ravignan plaide avec justesse l'idée selon laquelle une sortie progressive du nucléaire est préférable à sa relance, quant au journaliste Thomas Blossville il plaide avec justesse ce qu'il faut savoir sur cette chaîne énergétique (presque) facile*

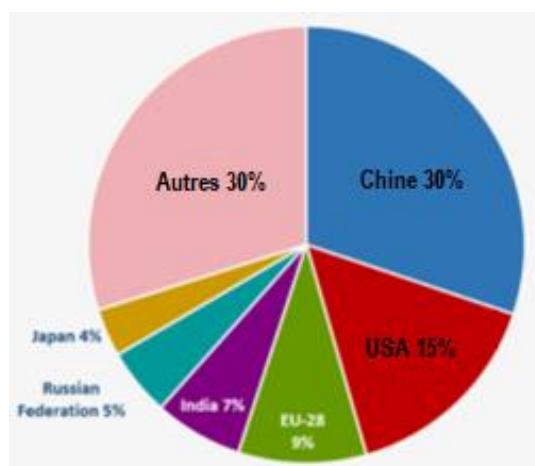
## 32 Les combustibles fossiles

### Le charbon



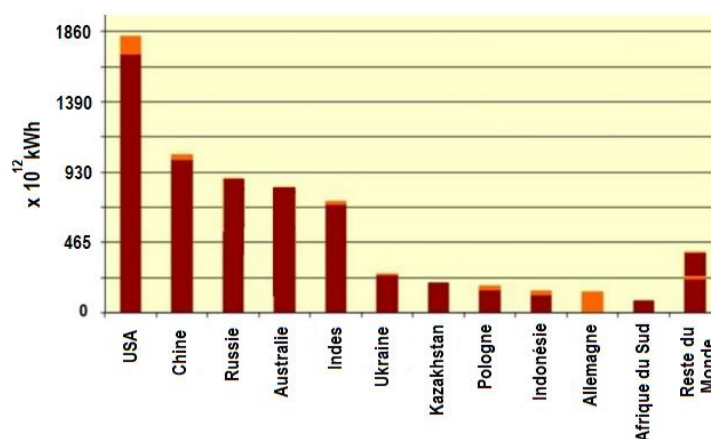
Le plus inquiétant serait que la transition énergétique ne se fasse pas maintenant et que pour satisfaire ses besoins en énergie Homo sapiens continue d'exploiter trop longtemps le charbon, là où les réserves seraient encore significatives, particulièrement pour des pays à forte population comme la Chine et l'Inde. 1 kWh produit avec le charbon rejette grosso modo 4 fois plus de gaz carbonique qu'avec le gaz et 2 fois plus qu'avec le pétrole. Si l'on en croit l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), créée par l'OCDE dans les années 70, qui prévoit en 2023 que la consommation mondiale de charbon les années qui viennent restera à des niveaux similaires à ce qu'il a été les années passées, on peut dire que la transition énergétique n'est pas pour demain.

Si un pays en voie de développement comme les Indes, pays qui n'est pas démunis en termes de réserve comme le montre la figure ci-contre, prenait exemple sur les Américains en consommant par habitant autant de charbon qu'eux, la consommation d'énergie fossile dans le monde serait sensiblement multipliée par 3 par le fait que ce pays est sensiblement 4 fois plus peuplé que les USA. Ce dernier pays, deuxième producteur de gaz à effet de serre derrière la Chine, on est, vu ses réserves importantes de charbon, rassuré par la mise en place de la nouvelle présidence américaine favorable aux accords de Paris sur le climat et son intention d'investir 2000 milliards d'€ pour atteindre un peu avant la Chine la neutralité carbone en 2050.



Pays qui génèrent le plus de gaz à effet de serre

Vu que les émissions mondiales de gaz carbonique résultants de la combustion du charbon sont en 2023 sensiblement 1000 fois supérieures aux capacités totales de stockage, avec le fait qu'il résulte de cette combustion une émission de CO<sub>2</sub> par kWh électrique fourni [très supérieures à celles du gaz](#), il en résulte qu'il va falloir que nous abandonnions totalement et définitivement le charbon. Ceci d'autant que les technologies de captage du gaz carbonique sont coûteuses, complexes et selon Goodplanet tenues secrètes par les USA.



Une dizaine de pays concentrent les réserves mondiales de charbon. La couleur en rouge plus clair concerne du charbon de moins bonne qualité que l'antracite.

### Principaux pays consommateurs

Les Indes (12 %) en sandwich entre la Chine (52 %) et les USA (7 %). Environ 80 % de l'énergie consommée par la Chine, premier consommateur mondial d'électricité devant les USA provient de la combustion de son charbon et ce pourcentage va encore s'accroître en 2023 avec la construction de nouvelles centrales.

### Le gaz

Une interdiction de ce combustible en l'absence d'un programme de génération énergétique de substitution performant permettant au préalable d'assurer notre confort thermique dans l'habitat est inappropriée.

## La moins mauvaise : l'hydroélectricité

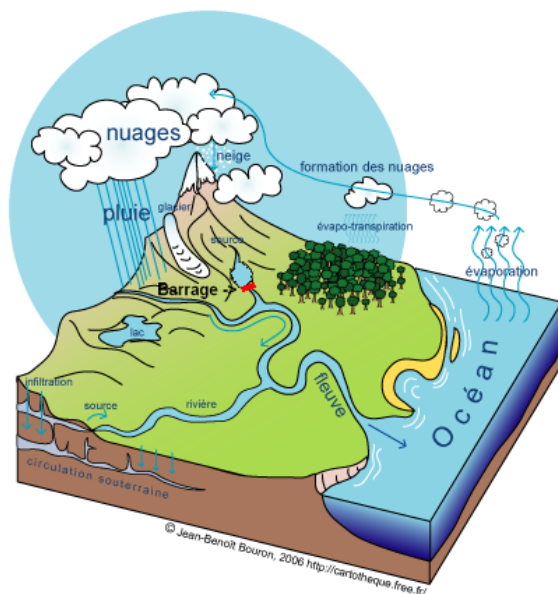
Bois exclus, l'hydroélectricité est l'énergie renouvelable la plus utilisée au monde et représente sensiblement 16 % de la production mondiale d'électricité assez loin devant le nucléaire (10 %), l'éolien (8 %) et le voltaïque. En raison d'une bonne hydrologie et d'un relief favorable [l'hydro-électricité française](#) assure encore sensiblement 10 % de notre besoin en électricité ce qui compense en partie le fait que la mise en œuvre du voltaïque dans notre pays est pratiquement inexistante sur le plan collectif.

C'est la Chine qui a construit sur son fleuve Yangtzé et contre l'avis des USA, les deux plus puissants barrages au monde : [celui des 3 gorges](#) de 22 GW et celui de Baihetan de 16 GW situé dans la partie amont du Yangtzé sur la rivière Jinsha

En 3<sup>ème</sup> position arrive le Brésil qui s'est associé au Paraguay lors de construction du barrage d'Itaipu de 14 GW sur le rio Parana.

Tous ces barrages chinois et brésiliens ont été particulièrement critiqués en raison de leurs impacts environnementaux.

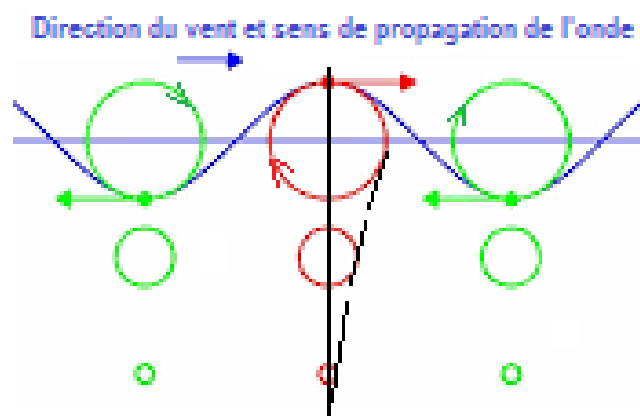
Pour donner l'échelle de telles réalisations, il faut savoir que la surface de la retenue du barrage brésilien est 130 000 fois plus importante que celle de Serre-Ponçon, le plus grand barrage français sur la Durance.



En complément des barrages hydrauliques conventionnels une petite dizaine de barrages français nommés STEP peuvent stocker l'énergie électrique. Ils le font avec l'eau douce mais, innovation française, l'un d'entre eux situé sur l'île de la Réunion va bientôt le faire de [avec l'eau salée](#).

L'hydro-électricité évolue.

Elle est maintenant le constat qu'en s'enfonçant sous le niveau de la mer, la houle, cette grave perturbation de surface, s'atténue rapidement. L'association de l'air et de l'eau et une meilleure compréhension du comportement de ces deux fluides ont permis la mise en œuvre de nouvelles réalisations d'éoliennes en mer méditerranée au large de Marseille qui vont bientôt rentrer en production comme on le verra page 75



## Les bonnes méthodes

### 33 Le soleil



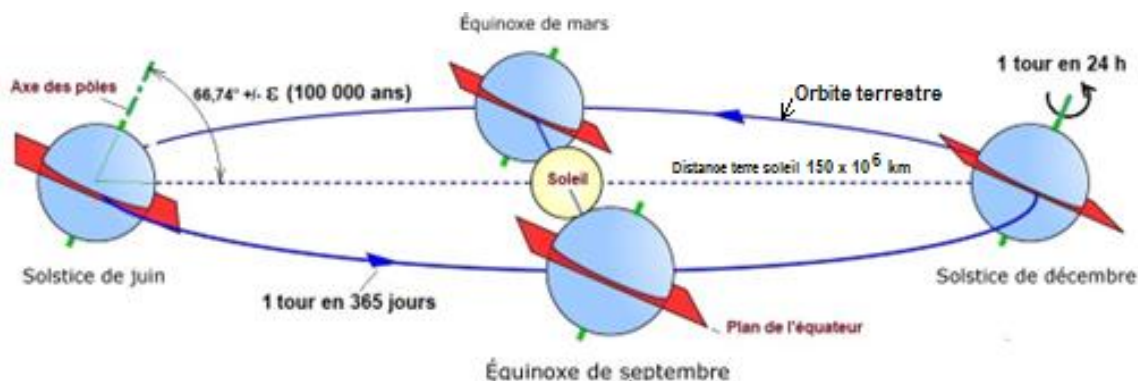
Comprendre que si la combustion du charbon est la grande responsable du réchauffement climatique de notre planète il va être possible de s'en passer pour la production de l'électricité. Ceci grâce à l'importance que va prendre le soleil pour la production d'énergie vu que le soleil libère plus d'énergie en une seconde que toute l'énergie consommée par l'humanité depuis son origine, et que notre maison, "la terre", reçoit du soleil en un jour une quantité d'énergie égale à ce qu'Homo sapiens consomme en 1 siècle.

Si l'on compare la quantité d'énergie que l'homme consomme annuellement sur terre pour assurer ses besoins à la quantité d'énergie thermique provenant du soleil pendant la même période, l'homme consomme 15 000 fois moins que ce qui est reçu, ce qui est rassurant en termes de potentialité solaire. En effet, selon Wikipédia et mon ami Georges, polytechnicien, la puissance du rayonnement solaire reçu par les couches les plus élevées de l'atmosphère est environ  $340 \text{ watt/m}^2$  en moyenne soit une énergie thermique reçue annuellement par  $\text{m}^2$  égale à environ  $3000 \text{ kWh}$  ( $0,34 \times 8760$ ) et compte tenu de la surface de la terre de 510 millions de  $\text{km}^2$  (océans plus surface terrestre) la puissance de radiation reçu du soleil est égale à :  $510\,000\,000 \times 1\,000\,000 \times 0,34 \times 8760 = 1,5 \cdot 10^{18} \text{ kWh}$ . La consommation annuelle par Homo sapiens étant proche de  $15\,000 \text{ kWh}$  (voir page 23), il en résulte que les 8 milliards d'habitants qui peuplent la terre en 2022 consomment en moyenne pendant la même période environ  $1,2 \cdot 10^{14} \text{ kWh}$ .

Pour preuve du considérable potentiel de l'énergie solaire, les centrales photovoltaïques françaises, pourtant en retrait par rapport aux autres pays européens, ont, durant une bonne partie de la journée du 4 avril 2023 et au tout début du printemps délivré autant de puissance qu'une dizaine de réacteurs nucléaires classiques. Le fait que la quantité d'énergie naturelle qui nous vient du soleil soit considérablement supérieure au besoin moyen de chaque homo sapiens est réconfortant mais plutôt que de recouvrir Paris d'une grosse bulle voltaïque pour assurer son besoin en électricité, il serait plus simple de prévoir quelques centrales voltaïques en grande banlieue sur des terrains désaffectés. Une surface de panneaux solaires égale à  $25 \text{ m}^2$ , deux fois plus faible que la surface disponible au sol par parisien, disposés sur des terrains désaffectés en grande banlieue à une distance raisonnable de notre capitale et faible par rapport à Flamanville, permettrait de générer annuellement une quantité d'énergie électrique proche de  $3\,000 \text{ kWh}$  sensiblement supérieur au nouveau besoin de  $2\,800 \text{ kWh}$  tel que cela a été défini à la page 41. Dans un pays chaud comme le Qatar il va falloir climatiser les stades pour que la température y soit supportable mais l'énergie nécessaire à cette climatisation devrait être assurée par le voltaïque grâce au soleil abondant dans cette région.

#### Solstices et équinoxes

L'équinoxe correspond aux 2 moments de l'année où le soleil se trouve au zénith à l'équateur terrestre. La terre se trouve alors à angle droit (en prenant les pôles) avec les rayons du soleil. Le jour et la nuit ont alors la même durée. En opposition à l'équinoxe, les solstices correspondent aux 2 moments de l'année où l'inclinaison de l'axe des pôles par rapport à l'équateur est maximum. La différence entre la durée de jour et de nuit est alors maximale. Ceci alternativement et de façon opposée entre les hémisphères nord et sud.





## L'angle de Milankovic

L'angle que fait l'axe autour duquel la terre tourne sur elle-même et son plan de rotation par rapport au soleil, notion que l'on doit à Milankovic, joue un rôle important sur les alternances jour-nuit et été-hiver. Pour simplifier disons que cet angle voisin de  $23,26^\circ$  lorsqu'il varie et comme cela est évoqué dans le chapitre « le temps qui passe », joue un rôle dans les variations climatiques.



Des scientifiques danois spécialistes de l'Arctique observent qu'en 20 ans la fonte de la calotte glaciaire du Groenland a affecté l'univers Inuit et provoqué une hausse des océans de 1,2 cm avec le fait que si tout devait fondre la hausse serait de l'ordre du mètre

## Panneaux solaires et biodiversité

Les parcs voltaïques pourraient faire bon ménage avec la biodiversité et la sécurité.

L'implantation de panneaux solaires au-dessus des autoroutes améliorerait la sécurité en évitant les chaussées glissantes lorsqu'il pleut et serait l'occasion de concilier la production électrique et l'agriculture en récupérant l'eau tombant sur le panneau voltaïque afin de suppléer au besoin de l'agriculture parfois en manque d'eau dans certaines régions françaises.



Quant aux technologies pour assurer la production d'électricité, elles diffèrent entre la cellule photovoltaïque mono-faciale classique et le panneau solaire biface utilisant l'albédo, une technologie qui peut, en diminuant le coût du mégawattheure, accroître la productivité en énergie électrique de 25 à 40 %. L'albedo (grandeur sans dimension inférieure à 1) est le pouvoir réfléchissant d'une surface, c'est-à-dire le rapport de l'énergie lumineuse réfléchie à l'énergie lumineuse incidente.

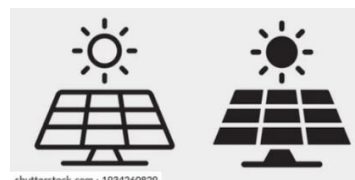
## Albédo de différente surface

- |  |  |
|--|--|
| - Corps noir parfait 0                     | - Sable sec 0,35 et glace environ 0,60 |
| - Sol sombre 0,05 à 0,2 (cultures, forêt)  | - Neige fraîche environ 0,8            |
| - Surface de l'eau 0,02 à 0,04 (lacs, mer) | - Miroir parfait 1                     |

## La production électrique des panneaux solaires

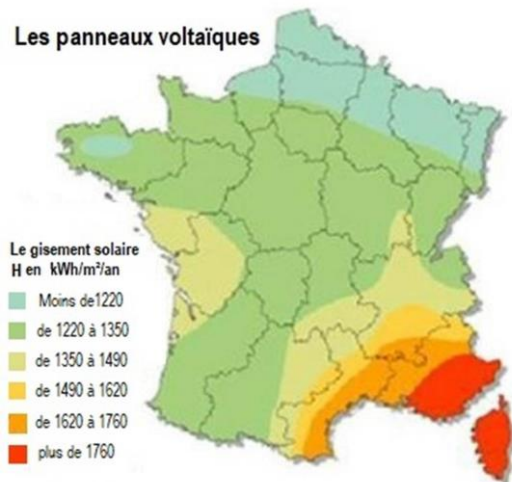
On a du mal avec internet à se faire une opinion de ce que peut apporter à l'année un panneau voltaïque de  $1 \text{ m}^2$  en quantité d'énergie électrique exprimée en kWh. Je suis tout de même parvenu à me faire une opinion en aidant une voisine ayant commandé un peu rapidement des panneaux solaires pour implantation sur le toit de sa maison située en Seine et Marne. Ce que l'on peut dire, c'est qu'en divisant par 10 la valeur H de l'ADEME exprimée en kWh/m<sup>2</sup>/an du panneau on obtient sensiblement la production électrique à l'année exprimée en kWh pour  $1 \text{ m}^2$  de ce panneau.

Ceci sachant que la nuit il n'y a pas de production, que l'inclinaison du panneau et son orientation par rapport au sud influe sur la production et qu'il faut tenir compte des performances de l'onduleur qui convertit le courant continu fourni par le panneau en courant alternatif compatible avec le réseau.

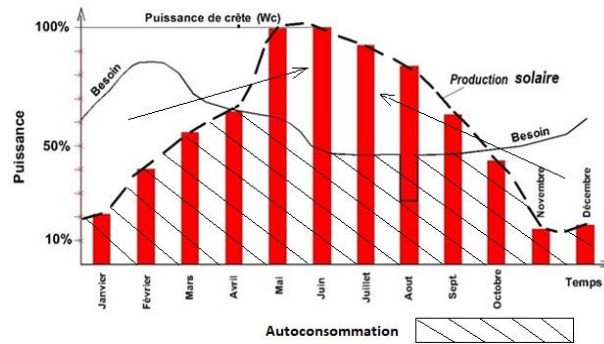


Il va falloir se préoccuper des matériaux à extraire de notre sous-sol pour la fabrication des panneaux solaires mais il est réconfortant de savoir que le soleil sera capable de satisfaire quantitativement nos besoins en énergie sur le long terme lorsque les combustibles non renouvelables tels que les produits fossiles seront épuisés ce qui ne va plus tarder avec le triste constat que si les autres pays imitaient la fission nucléaire française il en serait de même avec l'uranium. Bien que la France soit à la traîne, la production européenne d'électricité voltaïque fait son apparition depuis 2 ans avec un constat : le soleil lui, est pour le moment inépuisable. Parmi les 3 régions du monde, l'Asie les Etats-Unis et l'Europe qui s'orientent vers les renouvelables c'est l'Asie qui représente actuellement la plus grosse production en produisant en ENR sensiblement la moitié de la production mondiale. Vu le potentiel énergétique considérable du solaire voltaïque aux USA (voir la page 91 de cartographie.pdf) il faut espérer que ce pays, capable de mettre en œuvre des technologies avancées, va passer à l'acte. L'Afrique et l'Amérique latine restent quant à elles les parents pauvres.

## Les panneaux voltaïques



Source Ademe



## Production et besoin

Cette figure permet de comprendre que la puissance fournie par le panneau (en rouge) varie de façon importante selon la saison. Elle permet aussi de comprendre que c'est plutôt lorsque le besoin est important à savoir pendant la saison hivernale que la production du panneau est la plus faible.

## Satisfaire le besoin grâce au stockage

On observe sur la figure de la page de droite qu'il serait possible de satisfaire le besoin en électricité de la ville à partir du soleil grâce à l'autoconsommation de la production solaire délimitée par un gros trait rouge. Au milieu de l'an 2022, l'autoconsommation solaire en France était sensiblement équivalente à la puissance d'une centrale nucléaire.



Le chauffage thermodynamique de l'habitat envisagé au chapitre 2, moins énergivore que la combustion et l'effet joule, particulièrement s'il est associé à la voiture hybride rechargeable permettrait de satisfaire le besoin en saison hivernale en limitant les transferts d'énergie et en allégeant les dispositifs de stockage de l'électricité. On comprend avec ces courbes qu'il nous faudra tenir compte du caractère intermittent des énergies éolienne et solaire en évitant dans la mesure du possible de boucher les trous avec les centrales électriques thermiques (gaz, pétrole, charbon, nucléaire). Ceci pour protéger la faune aquatique et éviter entre autres que le nucléaire refroidi par l'eau de nos rivières n'élève trop la température des fleuves. Une contrainte difficile à respecter sans réduire la fourniture d'électricité lorsque le débit des fleuves baisse en raison de la sécheresse.

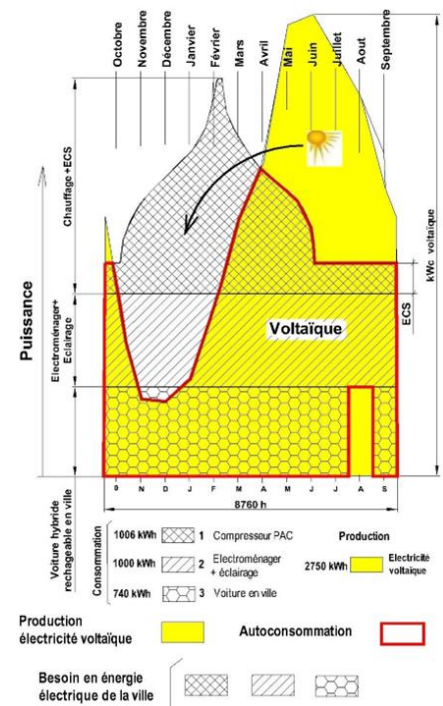
En observant la canicule que l'Europe subit actuellement alors qu'elle était prévue pour 2050 on peut craindre que les simulations du GIEC sur le climat soient optimistes. On peut se demander si le choix actuel de la France en ce qui concerne notre mix énergétique tient suffisamment compte du climat et si nos futurs réacteurs nucléaires avec leur durée de vie de 80 ans + 10 ans de construction seront toujours refroidis toute l'année jusqu'en 2110. La disparition progressive des glaciers provoquée par l'élévation de la température moyenne sur terre qui dépasse 2°C transforme nos fleuves en oued pendant les mois de canicule alors que nous sommes pour le moment sur une trajectoire catastrophique de + 3°C !

Nous allons même devoir freiner le développement de l'internet qui ne supporte pas les coupures d'électricité et qui demande de plus en plus d'énergie (actuellement 5%)

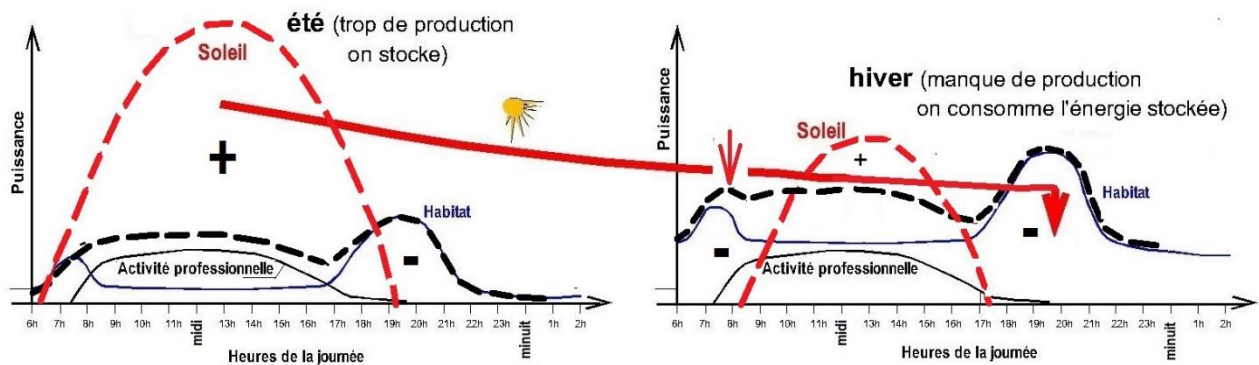
Il faut espérer que la crise économique consécutive à la guerre en Ukraine va nous obliger à modifier rapidement nos habitudes et faire la chasse au gaspillage.

La promotion des énergies renouvelables d'origine solaire associées à l'électricité d'origine voltaïque est freinée actuellement en France par des obstacles à l'autoconsommation. La technologie de l'onduleur convertissant le courant continu fourni par le panneau voltaïque en courant alternatif compatible avec le réseau est pourtant bien maîtrisée et performante. Il s'agit vraisemblablement d'obstacles d'origine financière, chaque partie située sur la chaîne énergétique de production et de livraison souhaitant mettre à son profit la différence importante entre le prix de revient élevé de l'électricité nucléaire et celui beaucoup plus bas d'origine solaire. Ceci quitte à compliquer le dispositif de comptage au détriment du social et de l'utilisateur final.

La réglementation et la législation de l'autoconsommation pour les systèmes basse puissance sont encore pour ces raisons pratiquement inexistantes. Ont tout de même été mises en place quelques tentatives d'autoconsommation dans le cadre du tertiaire (mairie, école...) et de l'industrie



Examinons maintenant la satisfaction du besoin sur la journée et non sur l'année avec une base de réflexion 365 plus faible que la précédente : le cycle jour-nuit au lieu d'été-hiver. Comme précédemment, seule l'électricité solaire voltaïque a été prise en considération pour la génération mais il a été ajouté au besoin de l'habitat l'énergie associée à l'activité professionnelle (industrie + agriculture). On remarque, sur la partie gauche de la figure, que pendant la période estivale, avec des quantités d'énergie produites journalièrement par les panneaux solaires supérieures aux besoins quotidiens, un stockage sur un cycle de 24 heures ne pose pas de difficultés particulières compte tenu des quantités concernées. Cependant en période hivernale et en l'absence de la combustion des produits fossiles et de l'énergie d'origine nucléaire, les besoins sont supérieurs aux possibilités de production d'énergie voltaïque ce qui pose un problème de stockage de masse de l'électricité vu les quantités importantes concernées.

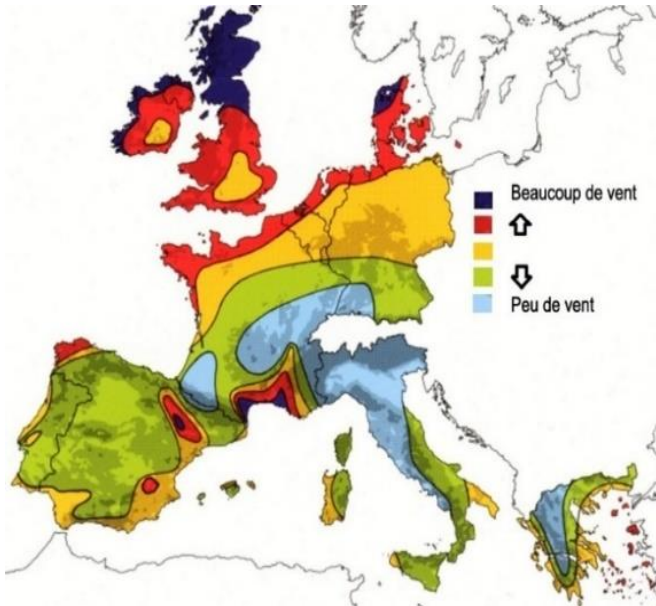


Nous allons maintenant passer à l'éolien mais la France, qui a déjà selon le journal le monde commis beaucoup d'erreurs en ce qui concerne sa politique énergétique, ferait bien de considérer que le potentiel énergétique du soleil étant très supérieur à celui du vent, il n'est pas bon pour elle que sa production en électricité avec le voltaïque soit inférieure à celle de l'éolien et qu'il convient de rétablir la situation. A la fin du 1<sup>er</sup> trimestre 2023 et image du considérable potentiel de l'énergie solaire, les centrales photovoltaïques françaises, pourtant en retrait par rapport aux autres pays européens, ont momentanément délivré autant de puissance qu'une dizaine de réacteurs nucléaires classiques.

*Avec le soleil, il est important de déconstruire le mythe selon lequel l'énergie nucléaire et celle associée à la combustion des produits fossiles sont les seules sources d'énergie capables de satisfaire notre besoin*

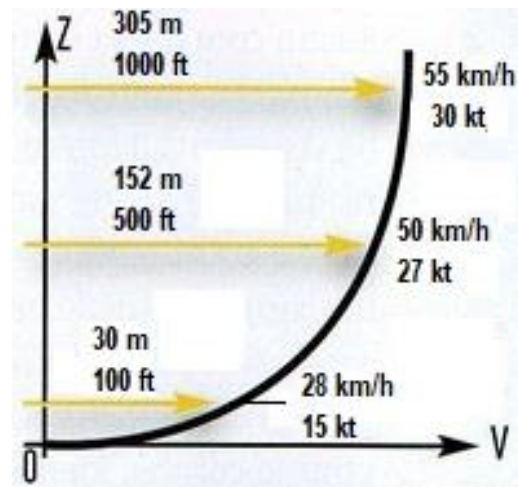
## 34 L'éolien

Heureusement, grâce au vent, la production d'énergie électrique renouvelable obtenue avec les éoliennes est complémentaire de la production voltaïque. On observe que le potentiel éolien sur le continent européen se situe surtout en Angleterre et dans le nord de l'Europe.



Justifiée par les effets de parois évoqués pour l'eau à la fin du chapitre précédent et qui sont aussi valable pour l'air, l'évolution vers le [gigantisme des éoliennes](#) tri-pales est impressionnant.

L'amélioration des performances de l'éolienne lorsque sa taille augmente s'explique par le fait que la vitesse du vent augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne du sol ou du niveau de la mer. Les viscosités de l'air et de l'eau sont certes très différentes mais lorsqu'un fluide se déplace le long d'une paroi (qu'il s'agisse de l'eau ou de l'air), la vitesse du fluide augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la paroi et est nulle au contact de celle-ci. Ces effets de paroi et les pertes d'énergie qui en résultent sont donc autant valables pour l'eau circulant dans une tuyauterie que pour l'air circulant à la surface de la terre. Il en résulte que les pales des éoliennes ne doivent pas être trop proches de la surface de la terre vu que la vitesse du vent augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne du sol comme l'indique la figure ci-contre.



On peut dire que la France s'est méfiée des décisions hâtives parfois génératrice de déceptions amères et a longuement hésité sur le choix de la solution entre le flottant, l'ancrage par perçage au fond de la mer et l'éolienne poids lourd posée sur le fond. C'est finalement vers cette dernière solution qu'elle a porté son choix pour son premier parc en posant après de très nombreuses années de réflexion son premier parc éolien marin en 2022. Mis en place sur le site de Fécamp au large du Havre, il sera à cet échéance le premier et le seul site éolien français opérationnel. C'est un navire-grue battant pavillon de complaisance panaméen, qui embarque ces mastodontes de 5 000 tonnes pièce en construction depuis plus d'un an dans le port du Havre.

Ces éoliennes sont acheminées par lot de 3 et déposées à 13 km des côtes Normandes sur un lit de gravier préalablement aménagé sur le fond marin peu profond. Ces fondations du type gravitaires, d'un diamètre de 31 m et réalisées en béton précontraint, présentent l'avantage de ne pas nécessiter d'ancrage et sont simplement posées sur le fond, leur masse énorme suffisant à stabiliser l'éolienne. L'installation de ces 71 mastodontes une fois achevée à la fin du printemps 2023, ce sera la mise en place des 3 pales qui vont être progressivement mise en place avec une précision millimétrique par une grue géante capable de soulever 1500 tonnes avec ses pieux reposant au fond de la mer pour être à l'abri de la houle. Et enfin ce sera le montage sur leur socle des turbines électriques d'une puissance unitaire de 7 MW et, on peut l'espérer une production électrique annuelle du site estimée à 1,8 TWh pour fin 2023.

Une autre réalisation de conception différente, l'éolien flottant en mer profonde, entre en phase terminale d'assemblage en France au large de Fos sur mer près de Marseille et devrait commencer à produire début 2024. Trois éoliennes de 8,4 MW chacune seront implantées sur une gigantesque structure flottante immergée de forme triangulaire retenues sous le niveau de la mer par des câbles pour éviter d'être soumises à l'effet de la houle. Le constat que l'effet de la houle décroît rapidement dès que l'on s'enfonce sous l'eau comme expliqué page 69 a permis d'éviter la mise en œuvre de coûteux atténuateur de houle en surface.

Il faut savoir que les éoliennes génèrent des ondes infrasonores de basse fréquence perçues à plus de 15 km de la source. Ces ondes inaudibles sont nuisibles pour le corps humain et il est probable que pour cette raison l'éolien maritime va prendre petit à petit la place de l'éolien terrestre.

Paradoxalement, bien que le potentiel en énergie électrique issu du voltaïque devance celui de l'éolien, c'est, selon le site *Révolution énergétique* l'éolien qui remporte actuellement la palme en Europe en assurant 17 % du besoin avec une production de 240 TWh alors que celle du voltaïque n'est que de 130 TWh.

Avec le plus grand parc éolien au monde *Hornsea* entré en service régulier cette année en 2022, l'éolien offshore anglais n'est pas en reste. D'une puissance de 1 218 MW comparable à celle d'une centrale nucléaire, il est situé en mer du nord à 89 km des côtes du Yorkshire.

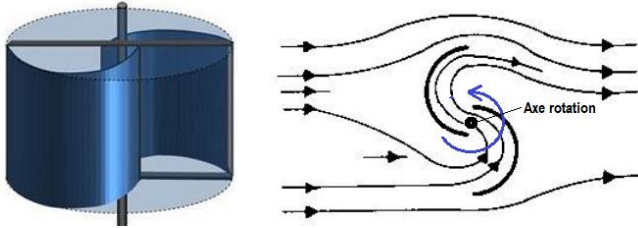
Quant à la Chine, l'immense appétit énergétique de l'empire du milieu est bien là par le fait que ce pays envisage la mise en œuvre en mer de Chine d'un parc éolien d'une puissance déconcertante comparable à la production électrique nucléaire française. Le choix se portera vers des éoliennes de forte puissance pour la raison que l'on vient d'évoquer et ce n'est pas moins de 2 700 éoliennes de 16 MW que ce pays 25 fois plus peuplé que le nôtre devrait commencer à implanter dès 2025 au beau milieu de la mer de Chine par plus de 100 m de fond au large de la ville de Chaozhou dans le détroit de Taiwan. Si on compare ces prévisions de parc chinois de  $2700 \times 16 = 40\,500$  MW au parc français 500 MW de Fécamp, c'est une puissance par habitant venant du vent 3 fois plus importante qui sera disponible en Chine par rapport à la France (80 fois plus puissant pour une population 25 fois plus importante que la France).

Si une grosse éolienne collective produit 50 millions de kWh en un an, sa puissance moyenne de production est égale à 50 000 000 kWh que divise le nombre d'heures contenu dans une année (365,25 que multiplie 24 h) soit 5703 kW. Quant à sa puissance maximum lorsque le vent souffle fort, elle peut être 3 fois supérieure, on parle alors d'une éolienne de  $3 \times 5703 = 11\,711$  kW, voire 5 fois supérieure, guère plus, selon la qualité de construction. Il n'y a pas encore à ma connaissance de solution pour faire fonctionner les éoliennes marines en zone cyclonique alors [qu'une solution existe](#) pour installer les éoliennes terrestres dans ces zones en évitant la casse et en optimisant la production.

### *L'éolien individuel ?*

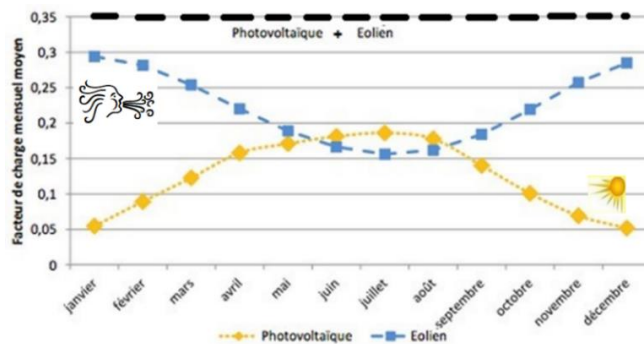
Le soleil et le vent sont étroitement liés. Associer l'énergie du vent à celle du soleil comme envisage de le faire la start-up lilloise *Unéole* avec ses éoliennes urbaines sera-t-elle une combinaison gagnante ? Elle a compris que pour être performante, une éolienne urbaine doit être installée au minimum entre 15 et 20 m au-dessus du toit des immeubles pour éviter les turbulences et tenir compte des effets de parois. Une turbine *Unéole individuelle* de type Savonius à 3 étages et axe vertical, haute de 4 mètres et de diamètre égal à 2 mètres produirait environ 1 200 kWh par an pour un coût proche de 5 000 euros. Malgré les efforts du constructeur leur retour sur investissement (RSI) risque bien d'être déraisonnable compte tenu du prix de revient du kWh des grosses éoliennes 3 pales. Quoiqu'il en soit, l'objectif du promoteur est de concevoir une machine urbaine plus silencieuse, moins encombrante, plus écologique que les éoliennes tripales que l'on ne peut pas installer en milieu urbain. Les turbines *Unéole* comportent plusieurs godets demi-cylindriques vrillés autour de l'axe de rotation. Le concept permet ainsi une prise au vent continue.

Va-t-on voir les éoliennes domestiques à axe vertical se multiplier sur les toits des maisons et des immeubles ? Vu les difficultés techniques en termes d'arrimage et de poids des fondations et les vibrations cela n'est pas garanti. L'idée du fabricant, d'augmenter le rendement global en combinant l'éolienne à des panneaux photovoltaïques, semble être à priori judicieuse puisque l'installation produira de l'énergie en hiver lorsque le zéphyr souffle et en été lorsque le soleil darde ses rayons.

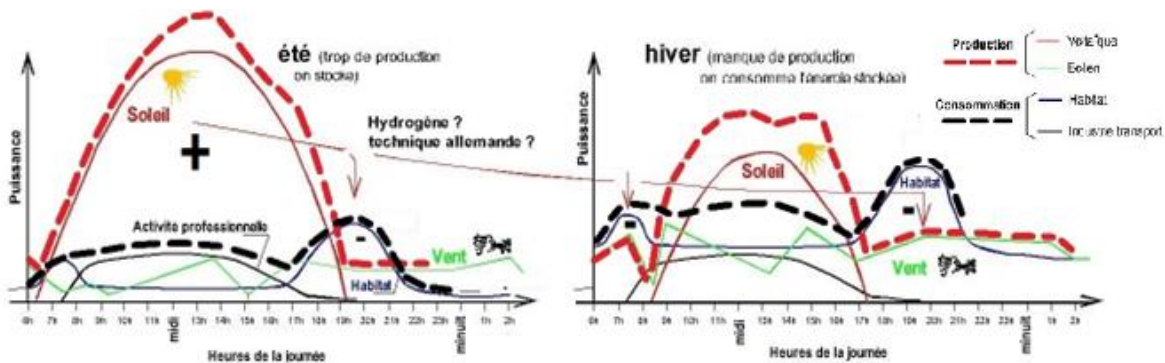


### Complémentarité éolien-voltaïque

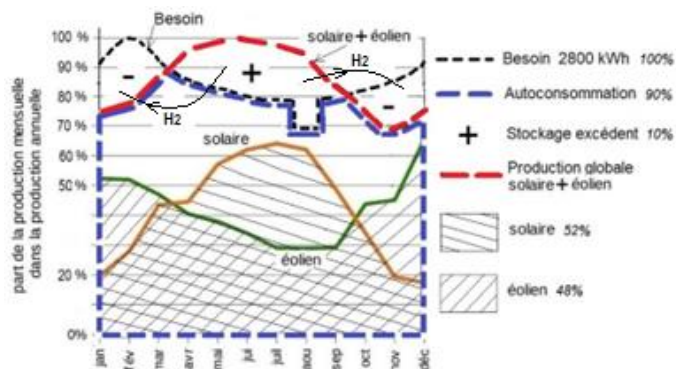
Cette figure, idyllique, montre que si l'on ajoute à la production d'électricité solaire la production électrique de l'éolien, ces deux techniques sont complémentaires particulièrement en hiver lorsque le soleil fait défaut. Plus proche de la réalité, la figure qui suit compare à nouveau la production conjuguée de l'éolien et du soleil au besoin, en tenant compte des saisons et en prenant à nouveau les mois comme base de temps.



Elle permet de comprendre que les quantités d'électricité devant être stockées pour satisfaire le besoin deviennent faibles du fait de la complémentarité entre les deux techniques.



La figure ci-contre donne aussi une vision de la complémentarité vent + soleil. Le solaire voltaïque produit en été au moins 3 fois plus d'électricité qu'en hiver alors que l'éolien produit environ 2 fois plus en hiver qu'en été. L'excédent de production estivale pourrait grâce à l'hydrogène produit en Espagne assurer le déficit de production hivernale afin de satisfaire en permanence le besoin européen en électricité (stockage été-hiver environ 10% du besoin total?). [Grâce à l'Allemagne](#) (Voir page 37) l'Europe prend conscience que le besoin en hiver pourrait être satisfait grâce à l'hydrogène.



*L'Europe prend conscience que l'hydrogène va prendre sa place pour assurer le besoin en électricité ce que ne peut faire à lui seul le couple vent-soleil*

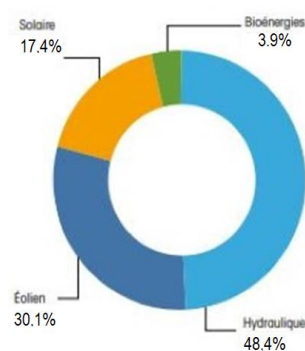
Ceci dit et bien que le vent soit derrière le soleil en terme de potentiel, la Suède, consciente que [les performances d'une éolienne s'améliorent avec la taille](#) en raison des effet de parois va développer dès 2030 des éoliennes marines de 370 m de haut pouvant développer une puissance sensiblement trois fois supérieure à celle des plus grosses éoliennes actuelles.

Les quantités d'énergie électrique devant être stockées restent certes importantes mais ne sont plus démesurées comme elles l'étaient avec le voltaïque seul. Pour éviter des coupures de courant, la production doit être en permanence légèrement supérieure à la consommation. Les STEP hydrauliques aident à satisfaire cette exigence mais seulement sur une échelle de temps limitée. Les techniques de régulation sont complexes mais grâce à l'électronique et aux prises d'informations sur machines, Homo sapiens commence à comprendre les technologies qui doivent être mise en œuvre pour assurer la régulation de tels systèmes de telle sorte qu'ils fonctionnent correctement. Selon le centre de réflexion *Ember* (European multimedia Bioinformatics Educational Resource) plus de 10 % de l'électricité mondiale proviennent déjà en 2021 du couple solaire + éolien.



### La production d'électricité verte en France

Cette production seule, voisine de 11 % du besoin total français se répartit comme indiqué sur la figure ci-contre. Une considération importante est le fait que le prix de revient du kWh électrique issu du vent ne peut qu'être supérieur à celui du soleil en raison de la plus grande complexité de la chaîne énergétique avec présence de boîtes mécaniques, d'alternateurs et de couteuses pales en matériaux stratifiés. De plus, protéger nos paysages en éloignant la source de production électrique de nos habitations va à l'encontre de l'intérêt qu'il y a de rapprocher la source de production du lieu d'utilisation. Un facteur aggravant est aussi celui du risque de casse en zone cyclonique.



Electricité renouvelable en France en 2019

Le potentiel éolien « on shore » de l'Europe est peut-être comme le pense le blog "révolution énergétique" plus important que l'estimation qui en avait été faite jusqu'à présent mais prétendre que cette chaîne énergétique pourrait, à elle seule, satisfaire l'ensemble des besoins en électricité de l'Europe en oubliant le Soleil et en ne faisant appel ni au nucléaire ni aux centrales thermiques n'est assurément pas réaliste.

Il est anormal dans le contexte d'urgence énergétique provoqué entre autres par la guerre en Ukraine que la France détienne le record européen de lenteur en ce qui concerne le [solaire voltaïque](#), d'autant que le voltaïque pourrait, selon le syndicat des professionnels du solaire, se déployer en France bien plus rapidement et plus économiquement que le nucléaire en fournissant en 2 à 3 ans l'équivalent en énergie d'un à deux réacteurs nucléaires. La part des énergies renouvelables en France est encore bien faible et éloignée de l'objectif européen de neutralité carbone. Ceci particulièrement si on la compare à la consommation globale d'énergie (fossile + nucléaire). La décision de *Jean Castex*, notre ancien premier ministre, de faire en sorte que l'axe prioritaire de notre stratégie en matière d'énergie renouvelable électrique soit la mise en place d'investissements dans le voltaïque à hauteur des 2/3 comparativement à l'éolien est une bonne décision. Particulièrement si cette mesure concernant la production électrique est associée à deux autres mesures :

- celle du stockage de l'énergie grâce à l'hydrogène : stocker de l'hydrogène c'est stocker de l'énergie électrique
- celle associée à une diminution de la consommation électrique grâce à l'eau comme cela est envisageable avec la "Solar Water Economy".

Il va falloir mettre les bouchées doubles pour que l'objectif visé en termes de production électrique « verte » représente un pourcentage significatif de la consommation actuelle d'électricité en France métropolitaine voisine de 510 TWh. Il faut bien sûr considérer que dans ce genre d'action il y a un début à tout.

Avant de clore ce chapitre sur la production électrique grâce au vent et bien [qu'une solution soit envisageable](#) pour éviter la rupture des éoliennes terrestres en cas de coup de vent hors du commun, on ne peut que regretter [ce qui vient d'arriver en Allemagne](#).

## 35 La géothermie

On a vu au 1<sup>er</sup> chapitre sur l'eau que lorsque l'on s'enfonce dans le sol, la température s'accroît sensiblement de 3 °C par 100 m de profondeur en raison de [l'interaction nucléaire faible](#). Les eaux souterraines que constituent les aquifères profonds tels que le dogger parisien sont naturellement réchauffées et prennent alors la température du sous-sol.



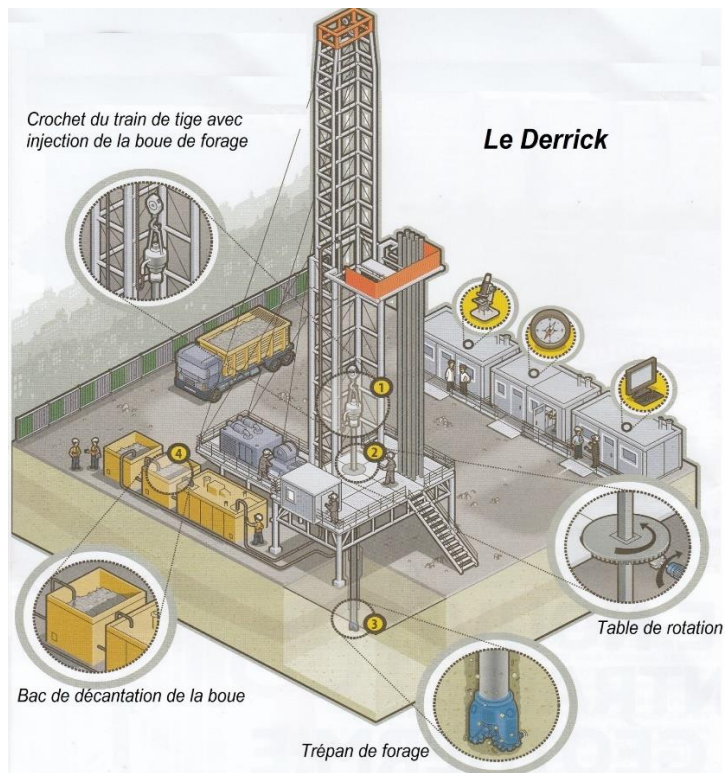
Tête de forage du doublet géothermique

```
DOSBox 0.74-2, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Program: LIN
<ENTREES>
diamètre intérieur de la tuyauterie= 200 mm
débit= 5000 l/mn
viscosité du fluide= .5 centistokes
longueur de la tuyauterie= 250 m
densité du fluide= 850 kg/m3
nombres de coudes à 90°...= 0
nombres de coudes arrondis= 2
<SORTIES>
vitesse du fluide= 2.641966 m/s
écoulement turbulent
nombre de reynolds= 1056786
longueur équivalente totale= 258 mètres
perte de charge totale= .7543159 bar
puissance perdue= 6.166532 kw
voulez-vous imprimer le résultat sur votre imprimante?
```

Un débit  $Q$  de 300 m<sup>3</sup>/h avec une chute de température  $DT$  de 50 °C c'est une puissance thermique  $P$  disponible de  
 $P = 1,16 \times Q \times DT = 1,16 \times 300 \times 50 = 17400 \text{ kW}$

Construire un doublet géothermique : un projet d'ampleur.

La réalisation d'une centrale de géothermie a été rendu possible grâce à l'expérience acquise par des sociétés comme Schlumberger dans les forages pétroliers. Elle passe par de nombreuses étapes. On analyse tout d'abord le contexte local : densité de logements, volonté des élus locaux, puis on réalise les études techniques et économiques. Commencent ensuite les démarches administratives : demande de permis de forer, étude d'impact environnemental, enquête publique. Enfin on passe à la réalisation du forage puis la construction de la centrale, le déploiement du réseau et la création des sous-stations. La réalisation d'un tel projet prend plusieurs années.



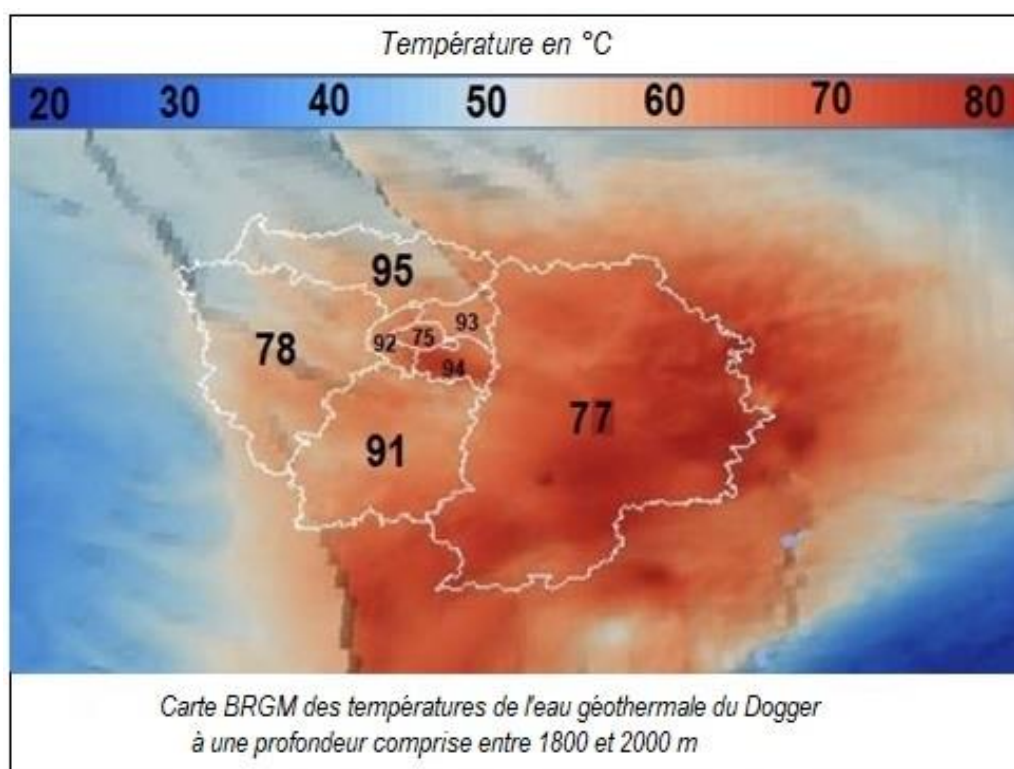


### *Le principe du forage Rotary*

Avant de construire la centrale de géothermie en surface, il faut forer le puits de production qui permet de pomper l'eau chaude et le puits de réinjection qui renvoie l'eau refroidie dans la nappe d'origine ; c'est le doublet géothermal. Les puits sont forés selon une technique éprouvée issue de l'industrie pétrolière : le forage Rotary. Le trépan fixé à l'extrémité d'un train de tiges est suspendu à un derrick pendant que les tiges tournent sur elles-mêmes. Les trois roues dentées du trépan sont entraînées par la pression de la boue de forage injectée par l'intérieur du train de tiges. L'ensemble grignote ainsi la roche et lentement la boue remonte les résidus de forage par la périphérie du train de tiges. Elle est ensuite filtrée puis réinjectée en circuit fermé. Le train de tiges est rallongé au fil de l'avancement et plusieurs diamètres de forage sont utilisés successivement en allant du plus gros vers le plus petit (26'' à 9''). A chaque changement de diamètre, les tubes sont scellés dans le puit formant alors sa structure interne. Lors du forage, les deux puits peuvent être déviés progressivement vers l'horizontal grâce à la technologie issue du gaz de schiste jusqu'à ce que chaque extrémité soit éloignée d'environ 1500 m de telle sorte que l'eau de rejet ne vienne pas refroidir l'eau géothermale.

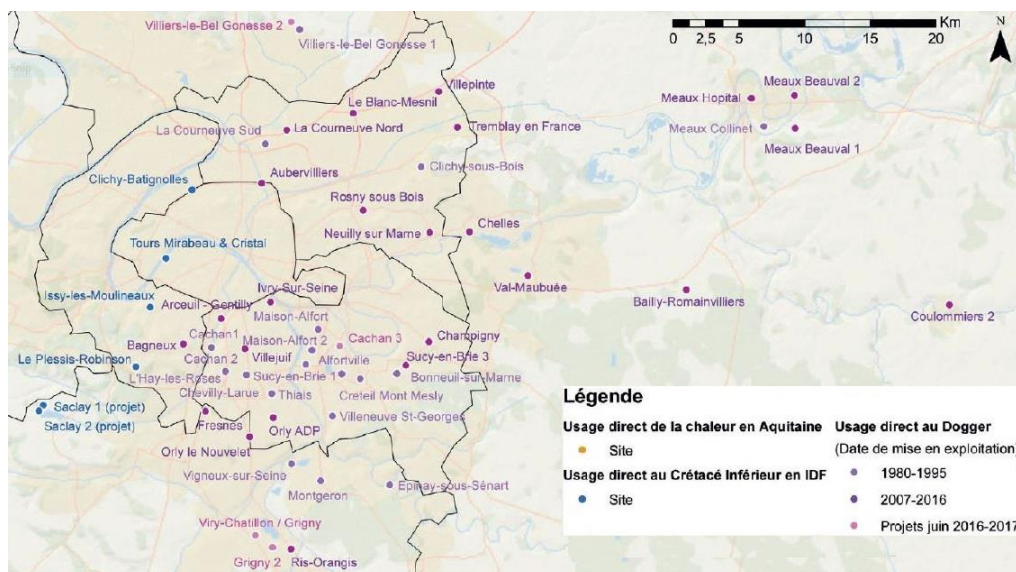
### *L'eau géothermale en Ile de France*

L'eau géothermale est l'eau des nappes profondes captives qu'il ne faut pas confondre avec les nappes libres superficielles qui s'écoulent vers la mer comme la rivière. La région parisienne commence avec le dogger à tirer profit de l'eau géothermale.



Mais il n'y a pas à notre disposition que les eaux souterraines pour solutionner les sécheresses et les canicules à répétition causées par le réchauffement climatique, il va falloir associer à ces dernières les eaux pluviales et les écoulements superficiels constitués par nos rivières. Ceci d'autant que notre besoin en eau va de plus en plus être associé à la satisfaction de nos besoins en énergie.

## Les réalisations géothermiques en région IDF

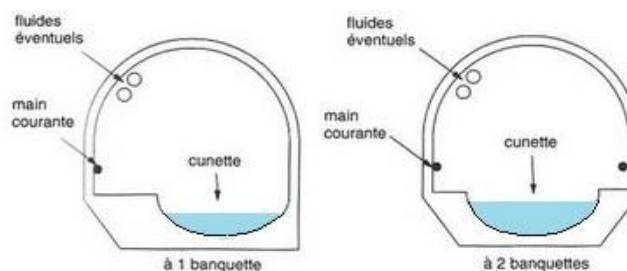


En 2017, le chauffage urbain en région parisienne comprenait déjà une petite cinquantaine de puits géothermiques

## Les réseaux souterrains et les égouts de Paris

Le sous-sol parisien est très chargé. Il abrite :

- le métro ancien et de celui du « Grand Paris » à venir (voir le fichier cartographie.pdf page 5),
  - des réseaux embryonnaires de chauffage urbain, certains associés à la combustion des ordures et d'autres tel celui de Villejuif utilisant uniquement l'eau géothermale,
  - le réseau d'eau potable,
  - le réseau d'eau non potable d'assainissement et de drainage associé aux égouts de Paris. Long de 2 500 km, il a pour fonction de collecter et d'évacuer la pluviométrie ainsi que les eaux usées produites par les différentes activités humaines. Souvent décrits comme un lieu obscur et nauséabond (notamment dans « Les Misérables » où Jean Valjean se perd en 1832), les égouts de Paris ont fortement évolué depuis les travaux entrepris par le préfet Haussmann et l'ingénieur Eugène Belgrand, tous deux à l'origine du réseau contemporain. Sous leur impulsion, toutes les rues de la capitale ont en effet été doublées d'une galerie en sous-sol, faisant alors de Paris l'une des villes les plus modernes au monde à ce sujet. Les égouts de Paris sont du type gravitaire. Ils permettent d'évacuer vers la Seine après passage par les stations d'épuration un débit important proche de 300 m<sup>3</sup>/s correspondant à la pluviométrie d'un violent orage. Ils sont interconnectés selon la hiérarchie suivante :
1. branchements particuliers de chaque immeuble,
  2. égouts élémentaires de 1,30 m de large sous chaque rue,
  3. collecteurs secondaires de 3 m de large avec cunette de 1,20 m
  4. collecteurs principaux de 5 à 6 m de large avec cunette de 3,50 m, en général sous les boulevards et enfin les émissaires (égouts ronds de 2,50 à 6 m de diamètre, non visitables qui transportent les eaux usées vers les stations d'épuration.



## La “Solar Water Economy” dans Paris et sa banlieue ?

Malgré une concentration urbaine particulièrement dense, les chiffres prouvent que les potentiels énergétiques naturels confondus du dogger et de la Seine devraient permettre de réussir notre transition énergétique en région IDF. Comme l'explique Jean-Marc Jancovici, il est exact que l'énergie thermique contenue à l'état latent dans un litre de pétrole (voisine de 10 kWh) est beaucoup plus importante que celle contenue dans un litre d'eau lorsque sa température varie de 10 degrés (Dans la pratique mille fois plus importante). Ceci dans la mesure où il faut, compte tenu de la chaleur spécifique de l'eau une énergie sensiblement équivalente à 10 kWh pour élever un mètre cube d'eau de 10 degrés. Ce qu'il est important de réaliser c'est qu'avec un débit moyen de 300 m<sup>3</sup>/s un fleuve comme la Seine charrie en une heure environ un million de mètres cubes d'eau. Si l'on refroidit ce volume de 10 degrés en hiver, on dispose en une heure d'une énergie thermique pour chauffer l'habitat égale à 10 millions de kWh. Ce résultat correspond, vu la population proche de 10 millions d'habitants pour Paris et sa banlieue, à une puissance disponible de 1 kW pour chaque Parisien et une énergie thermique disponible annuellement de 8760 kWh à comparer au besoin de 3600 kWh évoqué à la page 41. En mettant en place un chauffage thermodynamique échangeant sur l'eau avec un COP de 5, la consommation annuelle en énergie finale électrique serait limitée à environ 1400 kWh/habitant, consommation électrique sensiblement 3 fois plus faible que ce qu'elle est actuellement en France (voir figure 19). Une diminution de la consommation électrique à ce point significative par rapport à la consommation actuelle laisserait suffisamment d'électricité disponible pour alimenter la voiture hybride rechargeable. Les chiffres qui précèdent relèvent de l'essentiel étant donné que la Seine n'est pas toujours à 10 degrés comme l'est la nappe libre en communication avec elle. À l'heure des télé-relevés, il est surprenant qu'aucune information ne soit disponible sur internet sur la façon dont la température de la Seine varie au cours de l'année. Quoi qu'il en soit lorsqu'elle est à 5 °C ou moins au plus froid d'un hiver rigoureux, son potentiel ENR pour le chauffage thermodynamique est nul. Heureusement, on a vu précédemment que les 2 potentiels *eau superficielle / eau géothermale* peuvent être ajoutés l'un à l'autre avec les échangeurs à plaques et que la chaufferie hybride peut éventuellement venir au secours du chauffage thermodynamique pour assurer le confort.

### **Nota**

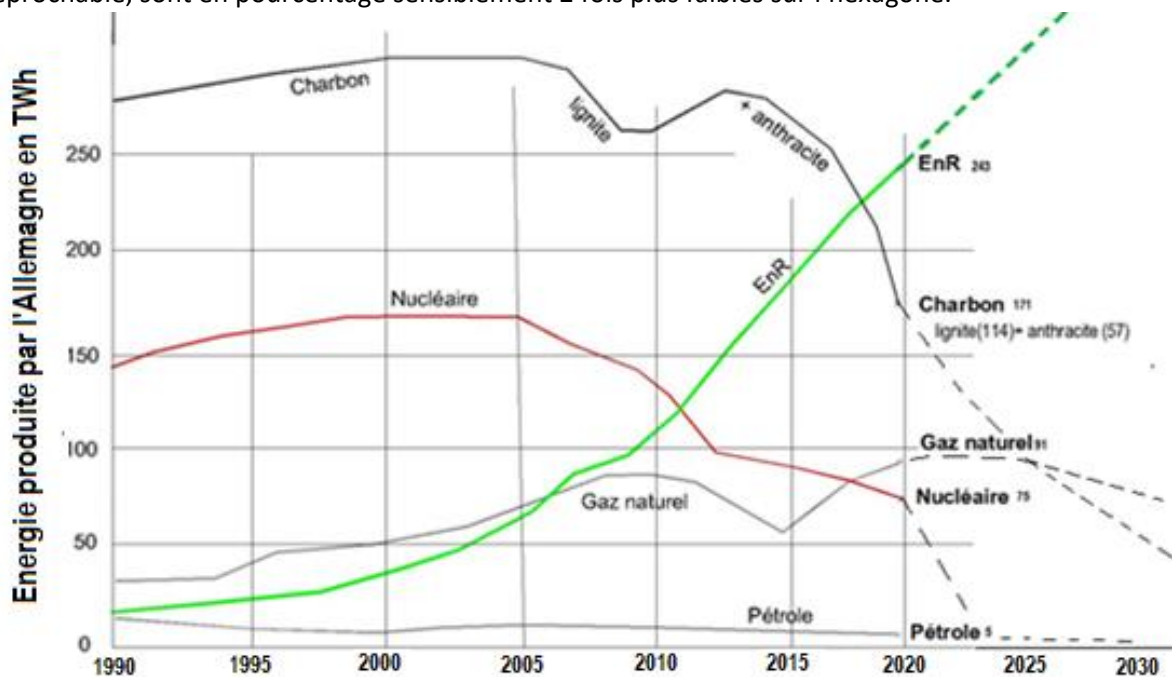
Avec 20 000 habitants au km<sup>2</sup> chaque parisien ne dispose que de 50 m<sup>2</sup> au sol ce qui n'est pas grand-chose.

On pourrait justement estimer qu'un doublet géothermique, qui nécessite une surface au sol voisine de 2 km<sup>2</sup> serait bien incapable d'assurer le besoin de 40 000 citoyens. Ceci par le fait qu'en fournissant un débit d'eau au plus égal à 300 m<sup>3</sup>/h à 70 degrés, cette dernière étant rejetée à 20 degrés dans le puits de rejet, la puissance disponible par parisien est limitée à 0,375 kW (300 x 50)/40 000). Il faudra bien sûr concevoir des échangeurs à plaques cumulant l'énergie géothermique à celle de la rivière mais cela devrait être a priori plus simple que de mettre l'EPR de Flamanville en production.

### *Un exemple : le couple franco-allemand ?*

Avant la guerre en Ukraine plus de la moitié du gaz utilisé en Allemagne était importé de Russie. La destruction du nouveau gazoduc en mer baltique qui prive l'Europe du gaz russe va être compensée par l'augmentation temporaire des importations de gaz en provenance de Norvège et des Pays-Bas. Concernant le charbon et après avoir abandonné le nucléaire en 2011 en raison de sa dangerosité, l'Allemagne a dû prendre la décision d'assurer temporairement son besoin avec la combustion du charbon. Cette décision arrive à son terme et le géant allemand de l'énergie, à savoir le conglomérat RWE fondé en 1898 a annoncé fin 2022 vouloir arrêter d'ici 2030 la production d'électricité avec ses trois centrales à charbon de 1 000 MWh situées dans le bassin minier rhénan, avançant de huit ans ses plans malgré les problèmes liés à la guerre Russie-Ukraine. Le prix de revient du kWh électrique avec le charbon étant bas, cela lui a permis, en vendant à l'utilisateur allemand le kWh électrique deux fois plus cher que celui qui est consenti par EDF à l'utilisateur français, de faire des économies dans l'intérim et d'investir dans le renouvelable. Quant au pourcentage d'EnR en Allemagne, il connaît grâce à sa puissance industrielle une forte progression et est maintenant sensiblement supérieur à 40 %. Il serait temps, à l'aube du

réchauffement climatique que la France réalise qu'elle ne peut pas continuer de faire cavalier seul en passant par la combustion, une chaîne énergétique qui réchauffe notre environnement et en recommandant le nucléaire qui passe par les hautes températures en perdant sous forme thermique sensiblement deux fois plus d'énergie que celle produite sous forme électrique. Les énergies renouvelables (EnR) allemandes devraient représenter 80 % de la production d'électricité en 2030 (courbe verte en pointillé). Notre voisin s'est résolument engagé dans la voie de l'éolien qui fournissait en 2021 environ le cinquième de ses besoins en électricité. Force est de constater que les EnR français qui proviennent pour l'essentiel de la construction des barrages sur nos rivières, une chaîne énergétique qui est loin d'être irréprochable, sont en pourcentage sensiblement 2 fois plus faibles sur l'hexagone.



*La courbe ENR n'indique pas la répartition entre le solaire et l'éolien. En 2023 et selon l'Agence fédérale allemande des réseaux, le besoin en électricité de l'Allemagne a été satisfait principalement à partir de l'éolien et du solaire confondus (55% contre 48 en 2022). Ceci alors que l'énergie électrique produite en France par le nucléaire représentait il n'y a pas bien longtemps les 3/4 du besoin, voire plus. Les Allemands ont commencé leur conversion vers les renouvelables dès l'an 2000 et nous sommes très en retard par rapport à eux en ce début 2023 alors que notre voisin est pourtant moins ensoleillé que nous avec un climat plutôt favorable à l'éolien.*

Grâce à l'Espagne au Portugal à l'Italie et à la Grèce le potentiel de la filière voltaïque de l'Europe est là et considérable. La France commence heureusement montrer le bout de son nez avec un début d'action avec l'autoconsommation. La production électrique française de cette filière pendant le dernier trimestre 2021 a peut-être été équivalente à celle de toute l'année 2020 précédente mais quantitativement parlant la France reste en retard par rapport aux autres pays européens. Le Rhin, à l'image de ce qui vient d'être proposé en région parisienne avec la Seine, pourrait être le vecteur d'une collaboration franco-allemande dans le domaine de la consommation d'énergie assurant la climatisation de l'habitat.

A contrario de ce que le président Macron envisage pour la France avec le nucléaire sans avoir consulté l'opinion publique, notre voisin allemand a raison de considérer que les énergies renouvelables portent en elles-mêmes, en complément d'une obligation climatique, une amélioration du climat économique et géopolitique.

C'est incontestablement l'Allemagne qui montre l'exemple de ce qu'il faut faire mais bien que cela soit insuffisant face au réchauffement climatique notre petit monde a tout de même installé l'an dernier et selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE) 50% de capacités électriques renouvelables en plus par rapport à 2022 et anticipe un rythme inédit dans les années à venir et ceci principalement avec le solaire voltaïque.

## 36 Stockage de l'énergie

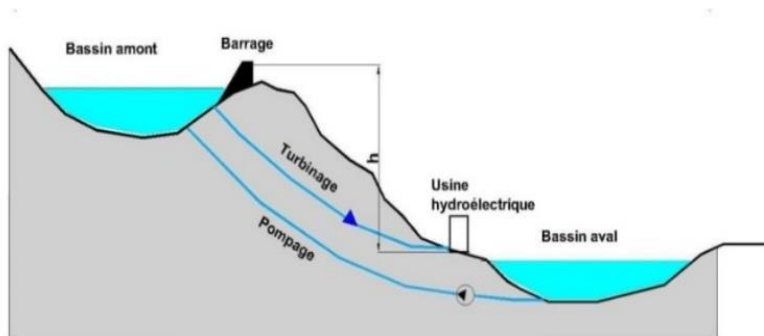
Au travers de ce qui précède, le lecteur aura compris que la complémentarité du soleil et du vent est imparfaite en ce qui concerne la satisfaction du besoin. Un stockage de masse va devoir être mis en place. Deux solutions se présentent.

### - **Electrique**

#### *Avec les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP)*

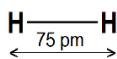
Encore relativement peu nombreuses dans nos régions, on peut citer : *Grandmaison* en France et *Linthal* en Suisse.

L'Australie a aussi prévu un très gros projet de stockage de l'énergie électrique de ce type dans la région montagneuse du Queensland.



Ce projet avec une mise en service prévue en 2035 est presque 3 fois plus puissant que celui de *Grandmaison*. Les ingénieurs en charge de ce projet hors du commun ont prévu de recharger la pile ou pour être plus précis de remonter l'eau dans le bassin supérieur avec l'énergie solaire aussi vite qu'on l'a déchargé et ceci sur une base chargement-déchargement journalière (5 GW pendant 24h ou ce qui revient au même une énergie disponible à la demande de  $5 \times 24 = 120$  GWh). Il faut dire que l'ensoleillement en Australie est sensiblement deux fois plus puissant qu'en France. Il est probable que l'énergie nécessaire à la construction de ce gigantesque projet sera le charbon riche dans cette région.

#### *Avec l'hydrogène*



L'hydrogène, premier élément [du tableau périodique des éléments de Dimitri Mendeleïev](#) évoqué à propos de la Chine dans le fichier *cartographie.pdf* est l'élément le plus léger et le plus abondant dans l'univers. La minuscule molécule de dihydrogène (75 picomètres) est composée de deux atomes d'hydrogène (**H**) qui n'existent pratiquement pas à l'état naturel sur terre.

L'atome d'hydrogène est en fait associé à d'autres éléments, par exemple dans l'eau avec l'oxygène (**H<sub>2</sub>O**) ou dans le méthane avec le carbone (**CH<sub>4</sub>**). Il serait même associé à la matière vivante ce qui pourrait l'impliquer dans les problèmes sanitaires actuels. Il pourrait aussi, en composant isolé et autonome, devenir le combustible de demain. Une nouvelle chaîne énergétique utilisant la pile à combustible pourrait, lorsqu'il est utilisé sous cette forme, générer à la demande de l'électricité ou de la chaleur. Dans les applications industrielles actuelles, on utilise trop souvent les produits fossiles comme source d'énergie pour produire l'hydrogène. Ceci alors qu'il est possible de l'extraire de l'eau par électrolyse en utilisant l'énergie électrique solaire en été lorsque cette dernière excède le besoin. Une fois extrait de l'eau par électrolyse le dihydrogène se présente sous la forme d'un gaz inodore et incolore qui a la particularité d'être énergétique. Ce gaz, de très faible densité massique, doit toutefois être refroidi à très basse température ou comprimé à très haute pression afin qu'il contienne dans un volume raisonnable une quantité d'énergie que l'on puisse stocker et transporter. Les fuites d'hydrogène étant selon les scientifiques climatologues du GIEC, 200 fois plus néfastes pour le climat que le CO<sub>2</sub>, il faudra probablement le transporter à l'état liquide et à très basse température dans des conteneurs parfaitement isolés et à la pression atmosphérique. Le stockage à grande échelle de l'énergie électrique sous forme d'hydrogène sera probablement difficile à mettre en œuvre mais l'enjeu est considérable.

## A basse température

Pour stocker dans un volume restreint et à la pression atmosphérique une masse maximum d'hydrogène, on transforme l'hydrogène en liquide en le refroidissant à très basse température (-253 degrés centigrade). Cependant, même à l'état liquide, l'hydrogène a une densité très faible et occupe à masse égale un volume environ 10 fois plus important que le kérosène. Cela pourrait inciter le secteur aéronautique à s'orienter vers la construction d'ailes volantes à profil épais pour stocker le carburant. Il a alors une masse volumique proche de  $71 \text{ kg/m}^3$  sensiblement 10 fois plus faible que le kérosène. Il peut alors être stocké à l'état liquide et à la pression atmosphérique dans des réservoirs sous réserve que ces derniers soient parfaitement isolés thermiquement\*. Cette technologie est réservée actuellement aux hautes technologies comme la propulsion spatiale. Les réservoirs de la fusée Ariane, conçus et fabriqués par Air Liquide et Airbus, contiennent 28 tonnes d'hydrogène liquide qui alimente son moteur central. Ces réservoirs, véritable prouesse technologique, ne pèsent que 5,5 tonnes à vide et leur paroi est très mince. Dans un réservoir comme celui de l'Airbus de  $300 \text{ m}^3$  on ne pourrait stocker que  $300 \times 71 = 21\,300 \text{ kg}$  d'hydrogène liquide. Mais compte tenu du fait que le pouvoir calorifique de l'hydrogène en phase liquide, (proche de  $115\,000 \text{ kJ/kg}$  ou  $33 \text{ kWh/kg}$ ), est sensiblement 3 fois plus élevé que celui du kérosène (voisin de  $12 \text{ kWh/kg}$ ), la quantité d'énergie stockée avec de l'hydrogène dans ce même volume ( $21\,300 \times 33 = 702\,900 \text{ kWh}$ ) serait sensiblement 4 fois inférieure à la quantité d'énergie stockée avec le kérosène ( $300\,000 \times 0,8 \times 12 = 2\,880\,000 \text{ kWh}$ ). Le réservoir d'hydrogène, à énergie emmagasinée équivalente, sera sensiblement 4 fois plus volumineux mais par contre probablement plus léger et pourrait justifier l'utilisation de profils d'aile épais. Reste l'étude complexe du profil de l'aile volante pour assurer la portance ainsi que l'accélération au décollage.

\* Le vide qui a une masse nulle et qui est parfaitement isolant semble parfaitement adapté comme isolant thermique pour l'aéronautique.

## A haute pression

L'hydrogène peut aussi être comprimé et stocké sous forme gazeuse. On peut ainsi en augmentant sa pression augmenter sa densité à température constante. Ainsi, à 700 bars, l'hydrogène possède une masse volumique de  $42 \text{ kg/m}^3$  contre  $0,090 \text{ kg/m}^3$  à la pression atmosphérique. Il peut alors restituer une quantité d'énergie voisine de  $5\,700 \text{ kJ/litre}$  ( $1,6 \text{ kWh/litre}$ ) pratiquement égale à l'énergie thermique dégagée par le gaz naturel ( $6\,300 \text{ kJ/litre}$ ). Le réservoir soumis à des pressions intérieures élevées est alors plus lourd et subit des contraintes mécaniques importantes. Pour éviter les transferts thermiques c'est probablement sous cette 2<sup>ème</sup> forme que l'hydrogène va être transportée dans le pipeline européen qui alimentera l'Europe en hydrogène (voir cartographie.pdf page 84) Ceci d'autant que l'on maîtrise bien grâce aux formules de Lamé et au logiciel OCES [le calcul des contraintes mécaniques dans une tuyauterie soumise à une pression intérieure](#). Aujourd'hui la majeure partie des constructeurs d'automobiles a retenu la solution du stockage sous forme gazeuse à haute pression. Cette technologie permet de stocker la quantité d'hydrogène nécessaire à une voiture alimentée par une pile à combustible pour parcourir de 500 à 600 km entre chaque plein. Un premier exemple : la construction suite à la COP21, il y a maintenant presque six ans, des taxis *Hype* conçus par Toyota

## Complément technique sur l'hydrogène

Homo sapiens est à la recherche d'un dispositif de stockage de masse de l'électricité d'origine renouvelable. Les [deux facettes de l'hydrogène](#) sont au cœur de la réflexion. Pour combattre l'alternance du couple éolien-voltaïque, stocker de l'hydrogène revient au même que de stocker de l'énergie électrique. De plus sur les très grandes distances, il est très probablement préférable de transporter l'énergie électrique condensée dans l'hydrogène plutôt que dans les interminables, coûteuses, et inesthétiques liaisons filaires aériennes actuelles. Grâce à l'hydrogène on pourrait en effet consommer l'énergie électrique sur un

emplacement situé à une grande distance de l'endroit où on l'a produite en supprimant les pertes d'énergie en ligne. C'est cette forme de raisonnement qui a conduit la chancelière allemande à conclure des accords avec le Kazakhstan malheureusement avortés suite à la guerre en Ukraine. Le manque de sérieux des autorités politiques qui ont jusqu'ici refusé de lancer un avertissement solennel sur les dangers qui menacent notre planète pourrait être dernière nous (voir le fichier cartographie.pdf page 32). Cet épisode de la guerre de l'énergie pourrait en effet prendre une forme « européenne » avec l'Espagne et le Portugal si comme on peut l'espérer les décisions sont à la hauteur des attentes. Arrivé à ce stade de l'évolution de nos chaînes énergétiques une étude comparative des dommages causés éventuellement à notre environnement par les dispositifs de stockage de l'énergie électrique tels que l'hydrogène et les batteries mérite examen. Pour garantir l'équilibre entre production et consommation et éviter les coupures de courant lors des pointes de consommation journalières et saisonnières, plusieurs solutions sont possibles :

- la plus coûteuse, celle qui consiste à accroître les moyens de production en construisant de nouvelles centrales nucléaires dites "modulables" qui ne fonctionnent qu'un nombre limité d'heures par jour ou même par an lors des pics de consommation.
- la deuxième solution qui consiste, en cas de déséquilibre entre l'offre et la demande, à réduire la consommation d'un site industriel ou d'un groupe de consommateurs le temps que la filière hydrogène se mette en place. C'est ce qu'on appelle *l'effacement*. Également appelé « *gestion active de la consommation* », l'effacement permet donc de piloter à distance la consommation pour maintenir l'équilibre du réseau et garantir ainsi une tension constante, sans devoir recourir à des centrales "modulables" qui sont la plupart du temps alimentées par des combustibles fossiles. Centrales qui sont non seulement fortement émettrices de CO<sub>2</sub>, mais plus coûteuses pour l'utilisateur dans la mesure où elles sont sollicitées au moment où le prix du mégawattheure est le plus élevé. Des marchés se mettent ainsi petit à petit en place principalement avec l'industrie. Il ne s'agit pas ici de se priver mais d'arrêter la fabrication des produits finis sur les chaînes de production lors des pointes de consommation et de l'accroître en bénéficiant d'un prix du mégawattheure plus attractif lorsque la demande en électricité est plus faible.

Pour ce qui concerne l'Europe, nous pourrions mettre en place des accords entre pays comme celui signé entre la Norvège et le Danemark pour assurer l'approvisionnement en électricité lorsque le vent fait défaut. Ou pour raisonner plus généralement, approvisionner le pays en déficit d'énergie à partir d'un pays voisin qui produit plus que ses besoins propres.

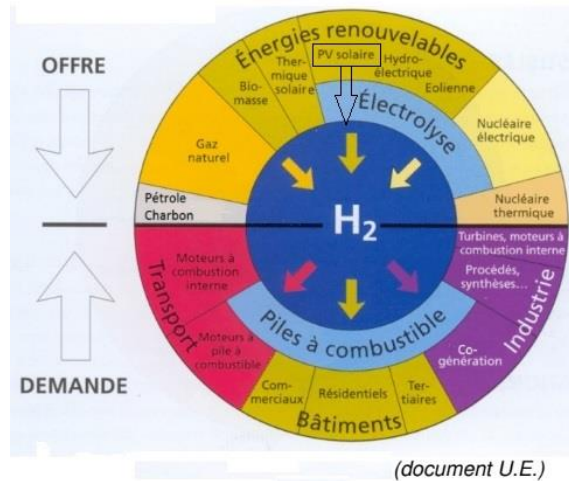
Multiplier les systèmes de stockage qui « emmagasinent » localement l'électricité lorsque la production excède la consommation et la restitue dans le cas contraire est la solution que le bon sens nous recommande de mettre en place au sein de l'UE. L'Allemagne a annoncé mi 2020 son ambition de devenir le « fournisseur et producteur numéro 1 » d'hydrogène dans le monde. Quant à la France son ambition pourrait être de concevoir en complément des trains à hydrogène (Alstom), des véhicules au sol type camions et cars ainsi que des avions neutres en carbone propulsés à l'hydrogène dès 2035. Alimentés par de l'hydrogène fabriqué en Espagne grâce au soleil, rentables par rapport à l'électrique pour les petites lignes régionales et moins polluant que le diesel, les trains à hydrogène construits actuellement par la société française Alstom pour son voisin allemand pourraient bien se développer rapidement en Europe.



Le *Suïso Frontier*, premier « hydrogénier » au monde

*Stocker de l'hydrogène, c'est stocker de l'énergie électrique.*

Il nous faudra tenir compte des [deux facettes de l'hydrogène](#) mais la figure ci-contre représente ce vers quoi l'Europe a probablement intérêt à s'orienter pour solutionner le problème de stockage de masse de l'électricité. La pile à combustible qui peut générer à la fois chaleur et électricité grâce à l'hydrogène pourrait bien être un complément de chaîne énergétique au chauffage thermodynamique de l'habitat. L'hydrogène étant facilement inflammable c'est dans une caverne que la Suède va stocker en profondeur de gigantesques quantités d'hydrogène pour assurer les besoins en énergie de sa sidérurgie et de son transport lourd.



Malheureusement les énergies renouvelables telles que le solaire voltaïque et l'éolien ne participent pas assez au chauffage de l'habitat au plus froid de l'hiver. Une modification en profondeur de nos chaînes énergétiques actuelles en utilisant le potentiel thermique de l'eau pour assurer ce besoin serait bénéfique à notre environnement dans la mesure où elle rejette de l'eau plus froide et non des gaz brûlés dans l'atmosphère pour assurer son fonctionnement. Notre intérêt pour protéger nos écosystèmes est donc assurément de développer intensément la recherche afin d'améliorer ces technologies. La molécule de dihydrogène est en effet particulièrement énergétique : la "combustion" d'un kg d'hydrogène libère environ 3 fois plus d'énergie qu'un kg d'essence, et ne produit que de l'eau en lieu et place des gaz brûlés.



Pour que cette nouvelle technologie puisse assurer les besoins en énergie de l'habitat et du transport il y a toutefois à cela au moins 3 conditions :

- Obtenir un prix de l'hydrogène raisonnable et améliorer les technologies permettant de le stocker sous la forme la plus adaptée.
- Ne pas se servir de la combustion des produits fossiles pour fabriquer cet hydrogène en utilisant l'énergie solaire voltaïque pour assurer l'électrolyse de l'eau. Et ceci même si les performances de l'électrolyse ne sont pas très élevées. La fourniture de documents attestant l'origine de l'hydrogène acheté et certifiant qu'il s'agit bien d'hydrogène vert commence à se mettre en place. Le fait que la technique de production par électrolyse ne représente aujourd'hui en France que 1 % de l'hydrogène produit est probablement la résultante d'une fiscalité inadaptée. Une fiscalité adaptée au besoin qui fasse que l'hydrogène produit par vaporeformage du méthane soit plus onéreux que celui obtenu par électrolyse de l'eau est à mettre en place.
- Prendre conscience que pour être conservé à l'état liquide et à la pression atmosphérique, l'hydrogène doit être maintenu à une température de  $-253^{\circ}\text{C}$  encore plus froide que celle du gaz naturel liquéfié (GNL) contenu dans les méthaniers et proche de  $-160^{\circ}\text{C}$ . Cette température très basse implique que les citernes de stockage de l'hydrogène utilisent un isolant thermique de grande qualité (peut-être le vide).

L'abandon du nucléaire et des produits fossiles pour ces nouvelles technologies est possible mais il faut prendre conscience que l'abandon des chaînes énergétiques actuelles ne se fera par la force des choses que progressivement. Cela va prendre du temps, une voire deux générations ? Il faut en effet se rendre à l'évidence que Paris ne s'est pas fait en un jour et qu'il y aura nécessairement une période transitoire pendant laquelle " l'hybride " à savoir l'association de l'électricité « verte » avec la combustion des produits fossiles va prendre place. Et ceci qu'il s'agisse du chauffage de l'habitat ou de la voiture individuelle. Il n'est pas irréaliste de penser pour les raisons évoquées ci-dessus que ces technologies se développent aussi dans l'aéronautique. Pour les long-courriers actuels, la masse de kérosène étant du même ordre de grandeur que celle des passagers, on peut imaginer tout l'intérêt qu'il y a à réduire la masse de combustible au profit



du nombre de passagers. L'évolution de la chaîne énergétique utilisant les moteurs à hydrogène pourrait semble-t-il prendre 2 formes :

- soit un fonctionnement comme un moteur à combustion interne raccordé à un réservoir en utilisant l'hydrogène comme combustible en lieu et place du kérosène, de l'essence ou du gazoil. Ceci en diminuant si possible son poids pour ce qui concerne l'aéronautique.
- soit en passant par la pile à combustible pour le chauffage de l'habitat en hiver. Une solution qui présente l'avantage de générer non seulement de l'électricité mais aussi de l'énergie thermique.

Les cellules silicone conventionnelles des panneaux solaires voltaïque actuels ainsi que celles en perovskite-silicium qui commencent à voir le jour et se préparent à une production industrialisée de l'électricité se sentent moins indispensables depuis l'apparition des [voitures équipées de moteurs à hydrogène](#). (un peu d'humour n'a jamais fait de mal à personne)

### *Avec les batteries*

Dans le cadre de l'électrification des moyens de transports aériens et terrestres, l'alliance de l'avion et de la voiture symbolisée en France par le tandem Airbus-Renault fait le pari de batteries nouvelle génération plus légère avec des temps de chargement très courts (environ 5 minutes). On pensait pourtant qu'en raison de leur poids les batteries ne seraient utilisées que pour le stockage de masse de l'électricité. Ceci à l'image de la Belgique, petit pays européen, qui vient de mettre en marche une puissante batterie en cellules lithium-ion d'une capacité de stockage de 100 MWh capable de fournir une puissance de 50 MW. La recherche de nouveaux composants tel que le cobalt baptisé "or bleu" et le lithium, un minerai recherché pour la fabrication des batteries alimentant les portables et les voitures électriques est probablement associée à la décision européenne de lancer la construction d'une « gigafactory » française de batteries qui seront construite sous licence taïwanaise. Ceci alors que 60 % de la production mondiale de cobalt se fait actuellement en République Démocratique du Congo, un pays qui posséderait 50 % des réserves mondiales. Le lithium pourrait aussi faire son apparition au Portugal ainsi que dans notre Alsace. Les réserves de lithium au nord du Portugal, déjà suffisantes au besoin européen, pourraient aussi être exploitées dès 2026 malgré le fait que mal entretenues, elles présentent des risques d'incendies. Il y a aussi les batteries au sodium-soufre, mises au point par une équipe de scientifiques chinois et australiens qui pourraient aussi être en passe de prendre l'ascendant. Elles seraient environ quatre fois plus légères que les batteries actuelles lithium-ion, elles-mêmes 2 fois plus légères que les batteries au plomb. Ceci dit, le sodium, composant existant en grande quantité dans l'eau de mer, est aussi pressenti comme le matériau des batteries de demain laissant le plomb loin derrière...

En concurrence avec la Corée du sud, la foire allemande de Hanovre où s'est tenu pendant de nombreuses années la plus grande exposition industrielle mondiale a vu naître une pile à combustible canadienne nommée *eFlow* ayant des performances sensiblement deux fois supérieures à la batterie implantée sur les voitures à moteur diesel actuelles.



### *Le monde et le voltaïque*

L'Arabie Saoudite, consciente que le monde du pétrole va bientôt être derrière nous a financé la plus grande centrale solaire voltaïque au monde. Elle sera mise en service dans le courant de 2023. Ceci, on peut s'en douter avec l'intention à terme de fabriquer de l'hydrogène avec l'électricité solaire produite. Quant à l'Europe, moins ensoleillé, la puissance cumulée des installations photovoltaïques sur notre continent atteindrait tout de même plus de 200 GW et représenterait déjà environ 12 % de l'électricité qu'elle consomme. Selon l'association professionnelle *Solar Power Europe* notre continent aurait implanté environ 28 GW de panneaux photovoltaïques supplémentaires lors de l'année 2021. Les politiques énergétiques de la France et de l'Allemagne ne sont pas les mêmes : Bien que les frais d'installation d'une batterie à domicile soient extrêmement élevés (avec un prix au kWh situé entre 600 et 1 000 €) nos voisins allemands se tournent de plus en plus vers ce moyen de stockage de l'énergie électrique. Ils rentabilisent ainsi l'autoconsommation de l'électricité générée par leur panneaux voltaïques en raison d'un prix de l'électricité au réseau le plus élevé d'Europe. Quant à la France qui commercialisait, il n'y a pas bien longtemps, le kWh électrique à 15 cts et celui du gaz à 5, on ne peut pas dire qu'elle soit socialement parlant une championne.

## - Thermique avec l'air et l'eau

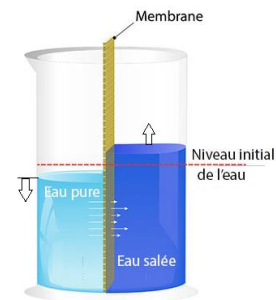
Concernant le stockage de l'électricité avec l'air type CAES (Compressed Air Energy Storage) capable de stocker l'électricité, les USA vont prochainement prendre la vedette en terme de taille devant la Chine en mettant au point deux centrales ayant une capacité de stockage totale 7 fois plus importante et ceci alors que les USA ont pourtant sensiblement 4 fois moins d'habitants au km<sup>2</sup> que la Chine qui vient tout de même de mettre en route dans une ancienne mine de sel une centrale capable de produire 1500 MWh (300 MW pendant 5h)

Quant au stockage de l'électricité grâce à l'énergie thermique et la chaleur spécifique contenue dans l'eau ce seront les Allemands qui seront les premiers et avant les Pays Bas à stocker ainsi l'électricité dans la banlieue berlinoise en utilisant l'eau contenue dans une énorme cuve cylindrique en inox de 56 000 m<sup>3</sup> et de 45 m de hauteur. L'eau contenue dans la cuve étant chauffée par des résistances alimentées par de l'électricité provenant de centrales solaires et d'éoliennes lorsque la production est plus forte que la demande. Il ne s'agit pas d'un stockage à l'échelle d'une saison mais d'un stockage à court terme (une quinzaine d'heures) qui cesse lorsque la demande devient plus forte que la production. La puissance thermique importante proche de 200 MW permettra de satisfaire 10 % des besoins de l'habitat berlinois durant l'hiver.

### Un petit complément sur

#### L'osmose

S'il n'y avait les travaux de recherche\* associés à la membrane semi-perméable de grande taille qui sépare l'eau douce de l'eau salée, la production électrique grâce à l'osmose dans des centrales électriques implantées à proximité de l'estuaire des fleuves serait peut-être déjà là. En effet le transfert de l'eau douce vers l'eau salée et le niveau du réservoir de droite ne s'arrête de monter que lorsque la salinité des deux réservoirs est la même. Tout y est, ni CO<sub>2</sub> ni gaz polluant, production en continu indépendante des conditions météorologiques et à la demande, silence.....



#### Le facteur de charge

Le facteur de charge d'une unité de production électrique est le ratio entre l'énergie qu'elle produit sur une période donnée et l'énergie qu'elle peut produire durant cette même période si elle fonctionne à puissance nominale. Le facteur de charge varie d'une unité de production à une autre, notamment en fonction :

- de la source d'énergie qui est intermittente ou non ;
- du niveau d'utilisation de l'unité de production (ex : arrêt forcé ou production limitée si la demande d'électricité est trop faible ou en cas de maintenance) ;
- de sa localisation (ex : ensoleillement de la zone pour les panneaux solaires, vitesse du vent pour les éoliennes).

La période de temps généralement considérée pour calculer un facteur de charge de référence est une année. Celui-ci s'exprime généralement en pourcentage. Prenons, par exemple, une éolienne de 2 MW de puissance nominale. Sachant qu'une année correspond à 8 760 h, cette éolienne pourrait, en théorie, produire au maximum :  $8\,760\text{ h} \times 2\text{ MW} = 17\,520\text{ MWh}$  (soit 17,52 GWh). Si l'éolienne considérée produit 4 000 MWh en un an, son facteur de charge est égal à :  $4\,000 / 17\,520 = 22,8\%$ . En 2015, le parc nucléaire français a eu un facteur de charge avoisinant 75 % (selon RTE\*\*).

Les énergies renouvelables ont un facteur de charge qui se situe en moyenne autour de 15 % pour les installations solaires photovoltaïques et de 24 % pour les parcs éoliens en France. Les centrales électrohydrauliques style Grandmaison et l'hydrogène ont un facteur de charge élevé et ont vocation à satisfaire la demande électrique lors des pics de consommation.



\*Des chercheurs qui cherchent on en trouve, mais des chercheurs qui trouvent on en cherche. Charles de Gaulle

\*\* RTE ou Réseau de Transport d'Electricité, c'est 9500 salariés, plus de 100 000 km de lignes haute tension, 250 000 pylônes et la difficile mission d'anticiper notre avenir énergétique.