

Quelles énergies pour demain ?

Introduction, résumé et plan général

La question de l'énergie va être la plus importante de ce siècle pour l'ensemble de l'humanité. Pour trois raisons qui vont être très difficiles à concilier :

* L'énergie est le « sang de l'économie » et de toute vie moderne : elle irrigue tous les secteurs de l'économie et de la vie de tous les jours dans nos pays développés. Et beaucoup de pays qui n'ont pas atteint ce stade souhaitent l'atteindre, au moment où la population mondiale ne cesse d'augmenter et devrait passer de bientôt 8 milliards d'habitants à 10 milliards voire davantage vers le milieu de ce siècle. C'est dire la pression sur la consommation d'énergie qui va se manifester,

* Après avoir utilisé depuis très longtemps de manière « artisanale » les énergies renouvelables (celle des animaux de trait et de charge, celle du vent dans les moulins à vent et la navigation à voile, celle de l'eau dans les moulins à eau, celle de la biomasse sous forme de bois énergie), l'humanité s'est toujours contentée d'accumuler l'usage des sources d'énergies disponibles au fur et à mesure de leur découverte. Or celles-ci sont passées à une échelle « industrielle » depuis plus de deux siècles : à la fin du XVIII^{ème} siècle, l'usage massif du charbon a donné lieu à la première révolution industrielle ; puis à partir de la fin du XIX^{ème} siècle, le pétrole a donné lieu à la deuxième révolution industrielle, complétée au XX^{ème} siècle par le recours de plus en plus important au gaz fossile appelé « naturel » ; toujours à la fin du XIX^{ème} siècle, l'électricité a fait son apparition avec les premiers réseaux électriques, mais ce n'est qu'au cours du XX^{ème} siècle qu'elle s'est massivement développée pour conduire à la troisième révolution industrielle en diversifiant les sources d'énergie primaire utilisées : l'hydraulique, première source utilisée, ensuite massivement les combustibles fossiles - charbon, pétrole, gaz - enfin, à partir de la 2^{ème} moitié du XX^{ème} siècle, l'énergie nucléaire. Ce faisant, à l'exception du nucléaire beaucoup plus exigeant à mettre en œuvre, l'humanité est toujours allée au plus facile, notamment avec les combustibles fossiles,

* Un évènement majeur est venu bouleverser cette facilité au début de ce siècle : la prise de conscience du réchauffement climatique, qui contraint l'humanité à s'engager dans la quatrième révolution industrielle qui est celle de la réduction massive de l'usage des énergies fossiles émettrices de CO₂ afin de limiter ce réchauffement. C'est un changement considérable qui va conduire à un report massif sur l'électricité dans la mesure où cette dernière peut être produite à partir de sources d'énergie n'utilisant plus les énergies fossiles. Mais cela réduit le champ des possibles à deux solutions principales seulement : l'énergie nucléaire, utilisée depuis plus d'un demi-siècle, et les énergies renouvelables, en premier lieu l'hydraulique et la biomasse déjà utilisées à grande échelle, et depuis le début du XXI^{ème} siècle, l'utilisation à une échelle industrielle permise par les progrès technologiques récents, des énergies du vent (éolien) et du soleil (photovoltaïque essentiellement) ces deux types d'énergies ayant connu un développement très rapide, artificiellement favorisé par des subventions massives depuis une quinzaine d'années. Et cette révolution énergétique (c'en est une) va s'accompagner d'une révolution numérique dont l'énergie de base sera également l'électricité.

NB : Il faut cependant y ajouter l'usage possible des énergies fossiles à la condition expresse d'y associer le captage et la séquestration du CO₂ produit afin de ne pas l'envoyer dans l'atmosphère.

En résumé, l'humanité est face à un choix stratégique :

La réalité actuelle rend extrêmement difficile cette quatrième révolution industrielle : l'humanité utilise toujours MASSIVEMENT les énergies à l'origine des trois précédentes, elle les a simplement « empilées » les unes aux autres, sans jamais avoir remplacé les précédentes. Dans ces conditions, la question qui se pose est de savoir si l'on va pouvoir se passer du charbon, du pétrole et du gaz (ce qui est indispensable) en supprimant également le nucléaire, comme le font certains pays européens (Allemagne, Belgique, etc.) alors que ce dernier n'émet pourtant pas de CO₂ en fonctionnement, pour remplacer l'ensemble de ces sources d'énergie uniquement par des énergies renouvelables, ou bien si conserver le nucléaire pour les pays qui maîtrisent cette énergie voire la promouvoir pour d'autres qui souhaitent l'adopter, est utile voire indispensable à leur sécurité et compétitivité d'alimentation en électricité.

De fait, la présente étude conclut que le seul choix réaliste et raisonnable est de se contenter de remplacer les énergies émettrices de CO₂, ce qui sera déjà un immense défi qui est très loin d'être gagné. Ce choix réaliste est ouvert à la France qui maîtrise le nucléaire depuis plus d'un demi-siècle, ce qui lui a déjà évité l'émission d'énormes quantités de CO₂, tout en apportant de nombreux autres avantages pour les raisons explicitées dans cette étude. S'en priver serait tout simplement une folie destructrice de l'un des avantages comparatifs majeurs du pays en termes de lutte contre le réchauffement et dérèglement climatique, d'indépendance énergétique nationale, de bas coût de l'électricité et de compétences et emplois industriels.

Après avoir rappelé plus précisément dans une première partie la longue histoire de l'usage de l'énergie par l'humanité (§ 0 à 4), cette étude analyse dans une deuxième partie (§ 5 à 10) l'état énergétique actuel, qui constitue le point de départ de ce qui reste à faire pour éliminer massivement le CO₂ de l'usage de l'énergie, puis les solutions possibles pour parvenir à ce résultat. Sont ainsi abordés :

- * La situation énergétique actuelle du monde en général et de la France en particulier (§ 5) ;
- * La revue détaillée des solutions décarbonées possibles (§ 6) selon différents critères qui les rendent plus ou moins facilement utilisables et efficaces : leur caractère permanent ou intermittent et variable ; l'ordre de grandeur de leur production possible eu égard aux besoins très élevés d'un pays développé de la taille de la France ; leur impact sur le fonctionnement du système électrique, qui est un système littéralement vital pour un pays développé et le sera d'autant plus dans le futur que l'électricité est appelée à devenir la source d'énergie ultradominante ;
- * L'analyse quantitative des besoins en électricité nécessaires en 2050 (§ 7) question cruciale pour le statut du pays à cette échéance ;
- * L'analyse de différents mix électriques à l'horizon 2050 allant du « 100 % d'énergies renouvelables » à des contributions croissantes du nucléaire (§ 8). Cette analyse montre les limites physiques d'un mix tout renouvelable qui implique des dimensionnements exorbitants en éoliennes construites à terre et en mer, et en panneaux photovoltaïques, rendant un tel scénario irréaliste pour cette raison. A ceci s'ajoutent d'autres difficultés voire impossibilités majeures, notamment la nécessité d'une rupture technologique dans le fonctionnement du système électrique dont personne ne peut actuellement garantir la faisabilité. Et même si cette dernière était finalement démontrée, elle serait porteuse de risques nouveaux sur la sécurité d'alimentation en électricité du pays. Au contraire, les mix comportant une part majoritaire de nucléaire, dans la continuité de l'existant, évitent à la fois toute rupture technologique risquée et les dimensionnements exorbitants en éoliennes et panneaux photovoltaïques. Ces mix offrent donc une garantie de sécurité d'alimentation en électricité bien supérieure en 2050 ;
- * L'analyse des coûts de l'électricité (§ 9) qui pour des éoliennes ou des panneaux photovoltaïques, dont la production intermittente et fortement variable est totalement incapable d'alimenter seule le réseau, ne se résument pas aux coûts « aux bornes » de ces éoliennes et panneaux. L'analyse des coûts doit inclure les surcoûts de compensation de l'intermittence de ces sources afin de retrouver le coût réel complet d'une production permanente capable de répondre à tout instant à la demande, comme dans la situation actuelle. De plus, comme ces sources intermittentes sont très nombreuses et réparties, elles entraînent des surcoûts très importants d'extensions et raccordements aux réseaux existants. On aboutit ainsi au « coût système électrique » global ;
- * Enfin, une réflexion sur la politique énergétique de la France (§ 10) qui doit se désolidariser de la politique du « tout éolien + photovoltaïque » aveuglément prônée par la Commission européenne et préserver et pérenniser absolument son parc nucléaire, qui procure au pays un avantage comparatif exceptionnel à la fois climatique, de sécurité d'alimentation, d'indépendance énergétique, industriel et économique.

0 – De l'aube de l'humanité à la première révolution industrielle

Durant cette très longue période qui s'étend sur plusieurs dizaines de milliers d'années, jusqu'à la fin du XVIII^{ème} siècle avec l'apparition de la machine à vapeur alimentée au charbon, l'humanité a utilisé des énergies à... 100 % renouvelables, mais à un niveau de consommation extrêmement faible !

La première d'entre elles a été l'énergie mécanique musculaire du... corps humain lui-même, qui présente la caractéristique d'être naturellement disponible mais est extrêmement limitée : un humain moyen adulte ne fournit guère plus qu'une puissance moyenne de 75 watts sur longue période, c'est-à-dire durant une journée de travail. Si celle-ci est de 10 heures, l'énergie journalière fournie atteindra 750 Wh, soit 0,75 kWh. Très peu, donc. Un sportif de haut niveau est capable de fournir une puissance de 300 voire 400 watts, mais sur une courte période de quelques heures. Sur une journée il pourra atteindre 1 kWh ou un peu plus, mais cela ne change pas l'ordre de grandeur. L'humain moyen est donc une « machine énergétique » aux performances extrêmement limitées...

La première conquête énergétique de l'humanité a été le feu, qui a apporté une énergie thermique utilisée pour cuire les aliments, se chauffer dans les périodes froides, ou tenir à distance les animaux sauvages, et plus tard pour cuire des poteries et élaborer des métaux (âges du cuivre, du fer...). Plus récemment, le feu a été utilisé pour par exemple chauffer les bains des romains. Mais il n'a pas apporté l'énergie mécanique nécessaire pour se déplacer ou effectuer des travaux agricoles par exemple.

L'autre conquête a été la domestication des animaux à partir du néolithique, essentiellement bovins et chevaux, utilisés comme animaux de trait ou de charge dans l'agriculture qui a permis son développement avec la sédentarisation des populations. La domestication des animaux a aussi favorisé les transports et les échanges de marchandises. Le saut énergétique a été quantitativement très important, un cheval étant capable d'une puissance de 750 Watts environ, produisant une énergie de 7,5 kWh pendant une longue journée, soit 10 fois plus qu'un humain en ordre de grandeur.

Ensuite, l'humanité a su exploiter l'énergie du vent et de l'eau en construisant des moulins à vent sur les collines et des moulins à eau sur les rivières ou encore des moulins à marée en bord de mer. Les premiers moulins de divers types étaient capables de puissances très variables mais globalement modestes. Pour fixer les idées, leurs puissances se situaient pour la plupart entre un kW (moulins à vent) à quelques kW (moulins à eau), selon les qualités des sites. Les progrès technologiques réalisés au fil du temps ont permis d'accroître un peu ces performances, pour obtenir l'équivalent de quelques dizaines de chevaux de trait. L'énergie fournie dépendait ensuite de la présence aléatoire de vent ou d'un débit d'eau suffisant, selon les cas. Mais des usages courants tels que moudre du grain s'accommodaient très bien d'interruptions.

Un autre usage du vent a bien sûr été la propulsion des navires grâce à l'invention des voiles et des quilles de bateaux (nécessaires pour remonter au vent), qui ont remplacé la force physique des galériens en permettant des puissances bien supérieures grâce à des entoilages qui sont devenus très importants au fil du temps. Mais les voyages restaient tributaires des vents.

Enfin, au cours du XVIIIème siècle, avec le développement des technologies, le bois énergie qui était utilisé depuis des millénaires pour cuire les aliments, se chauffer, élaborer artisanalement des métaux, etc. a commencé à être massivement utilisé dans la fabrication d'objets mais aussi dans les premières machines à vapeur. A tel point que l'étendue des forêts à la fin de ce siècle avait beaucoup diminué en France et en Europe, ce qui a signifié la fin de l'usage d'énergies totalement renouvelables, la quantité de biomasse utilisée étant devenue supérieure à son renouvellement naturel. La France actuelle a beaucoup plus de surfaces forestières et de bois sur pied qu'à la fin de cette époque !

En résumé, durant toute cette période extrêmement longue, les quantités d'énergie thermique ou mécanique dont l'humanité a disposé ont certes augmenté au fil du temps, mais sont globalement restées extrêmement modestes. Malgré la faible population mondiale (un milliard d'habitants environ à l'orée de la première révolution industrielle), ceci n'a pas permis à chaque humain de disposer d'une énergie significative, nécessaire pour notamment accéder à une eau saine et suffisamment de nourriture, sauf pour quelques privilégiés. Mais même les attelages de 8 chevaux de Louis XIV ne développaient guère plus de 6 kW, 10 % de la puissance mécanique d'une voiture citadine actuelle.

1 – La première révolution industrielle

C'est celle du charbon, combustible plus énergétique et plus abondant que le bois, qui a permis un développement très rapide de machines à vapeur de plus en plus puissantes, d'abord en Angleterre puis rapidement ensuite en France, en Allemagne et dans la plupart des autres pays européens.

Ces machines à vapeur, de plus en plus performantes et capables de fonctionner en permanence dès lors qu'elles étaient alimentées en charbon et en eau, ont permis d'atteindre des puissances de plusieurs dizaines puis rapidement centaines puis milliers de kW en multipliant leur nombre dans les usines. Elles

ont ouvert la voie à des applications industrielles à grande échelle pour produire massivement des aciers et de nombreux autres objets technologiques de plus en plus variés. Elles ont permis le développement des trains à vapeur de plus en plus puissants et rapides ainsi que celui de la marine à vapeur, qui a permis de s'affranchir des caprices du vent et d'augmenter fortement la vitesse moyenne et la régularité lors des traversées des océans.

Cette première révolution industrielle a donc eu pour moteur principal la disponibilité d'énergie à la fois sous forme thermique et mécanique à une échelle jamais connue auparavant dans la longue histoire humaine. Pour la première fois, les humains ont disposé de puissances mécaniques plusieurs centaines à milliers de fois supérieures à leur dérisoire puissance musculaire. C'est cet « effet de levier » énergétique qui a permis l'émergence du monde moderne dans lequel nous vivons.

Fait important à noter : le charbon, moteur de la première révolution industrielle, est toujours très largement utilisé dans le monde près de deux siècles et demi plus tard, notamment pour produire de l'électricité (voir plus loin, § 5) et élaborer les aciers, ce qui pose un sérieux problème pour le climat.

2 – La deuxième révolution industrielle

C'est celle du pétrole, connu depuis l'antiquité, mais ses usages étaient alors limités à quelques applications, comme le calfatage des coques des bateaux pour les rendre étanches. C'est dans la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle que son usage comme source d'énergie massive a progressivement pris son essor, avec l'apparition des moteurs à combustion interne utilisant l'essence, le gazole ou plus tard le kérosène pour les turboréacteurs, qui se sont progressivement généralisés au XX^{ème} siècle en équipant voitures, camions, trains puis bateaux et avions. Les dérivés du pétrole assurent toujours 96 % de la mobilité.

Ce succès s'explique par la très grande énergie volumique et massique du pétrole (environ 11 kWh par litre) ce qui le rend très performant, allié à sa grande facilité de transport et de stockage. Là où la machine à vapeur est restée cantonnée aux installations fixes et aux applications mobiles acceptant des masses très importantes (trains et bateaux) conséquence de la faible puissance massique de sa mise en œuvre dans des machines à vapeur, le pétrole a équipé tous les autres moyens de locomotion.

Le pétrole a également eu d'autres applications énergétiques comme le chauffage puis la production d'électricité (à titre indicatif, il est également une matière première très importante pour la chimie, en particulier la fabrication de la plupart des matières plastiques).

En résumé, le pétrole occupe toujours une place extrêmement importante dans le monde par ses applications énergétiques (voir plus loin, § 5).

3 – La troisième révolution industrielle

C'est celle de l'électricité, dont les premiers usages énergétiques sont apparus à la fin du XIX^{ème} siècle, simultanément aux Etats-Unis et en Europe. C'est une révolution très différente dans la mesure où l'électricité n'est pas une énergie « primaire » comme le charbon ou le pétrole qu'il suffit d'extraire du sous-sol, mais un « vecteur énergétique » qui doit être élaboré à partir d'énergies primaires.

Les premières machines utilisées pour fabriquer de l'électricité, dynamos et alternateurs, capables de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique, étaient entraînées par des turbines hydrauliques, déjà bien connues à l'époque.

L'électricité s'est ensuite progressivement répandue grâce au développement tout au long du XX^{ème} siècle d'une part des réseaux d'électricité, permettant de relier les consommateurs, industriels et domestiques, aux centrales de production, d'autre part des technologies ayant permis de diversifier les sources d'énergies primaires utilisées, hydraulique, puis charbon, puis fioul lourd issu du pétrole, puis plus récemment gaz naturel fossile. Enfin, dès la fin de la seconde guerre mondiale, l'humanité a trouvé le moyen d'utiliser l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité, innovation qui possède parmi d'autres deux avantages majeurs qui s'avèrent fondamentaux : elle n'émet pas de CO₂ et elle est très concentrée en masse, volume et occupation des surfaces au sol, ce qui réduit son impact spatial. Ses déchets ultimes sont également très peu volumineux.

4 – La quatrième révolution industrielle

C'est celle que nous vivons actuellement depuis le début de ce XXI^{ème} siècle. Son enjeu est, comme déjà souligné, de substituer progressivement aux énergies fossiles, encore massivement utilisées dans le

monde et même dans certains pays européens (Pologne, Allemagne, etc.) de nouvelles sources d'énergie « primaires » n'émettant pas de CO₂, qualifiées de « décarbonées » pour cette raison, afin de limiter l'augmentation de l'effet de serre qui accroît la température du globe et dérègle profondément le climat.

À l'énergie hydraulique largement utilisée depuis la fin du XIX^{ème} siècle et à l'énergie nucléaire utilisée depuis la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, qui sont les deux piliers actuels de la production française d'électricité décarbonée, sont venues s'ajouter les énergies du vent et du soleil, énergies renouvelables à l'instar de l'hydraulique, de la biomasse et de quelques autres comme la géothermie ou l'énergie des mers.

L'importance actuellement donnée à l'éolien et au solaire provient du fait que ces sources d'énergie primaires sont très abondantes... « sur le papier » ! Mais, comme elles sont diffuses (c'est-à-dire très peu concentrées spatialement) elles consomment énormément d'espace et si vent et soleil sont effectivement renouvelables, tous les matériaux nécessaires pour construire les panneaux photovoltaïques et surtout les éoliennes sont loin de l'être : certains d'entre eux, dont les « terres rares » (qui ne sont pas rares mais dont l'extraction et la purification est très polluante) et d'autres métaux indispensables (y compris le cuivre, matériau courant mais de plus en plus utilisé) existent en quantités limitées dans la croûte terrestre. Ce qui rend ces énergies beaucoup moins « renouvelables » qu'on ne le dit.

En outre, contrairement aux autres formes d'énergie, elles sont intermittentes et fortement variables : elles ne produisent de l'électricité que lorsqu'il y a suffisamment de vent ou de soleil selon le cas, et non en fonction des besoins des humains. Ce qui soulève des problématiques nouvelles redoutables.

5 – La situation énergétique actuelle reste fortement caractérisée par l'empilement des usages des sources d'énergie apparues historiquement

- Dans le monde

Avant d'envisager les futurs énergétiques possibles, il est indispensable de bien connaître la réalité mondiale actuelle. Or, celle-ci reste profondément marquée par l'usage toujours ultra-majoritaire des énergies d'origine fossile. Quelques ordres de grandeur :

* Tous usages confondus, le charbon, le pétrole et le gaz fossile représentent à eux trois 80 % de toute l'énergie primaire consommée, dont environ 27 % pour le charbon, 33 % pour le pétrole et 20 % pour le gaz ;

* En moyenne dans le monde, l'électricité est toujours produite à près de 40 % à partir de charbon, combustible le plus émetteur de CO₂. Parmi les pays les plus peuplés de la planète, ce taux atteint près de 65 % en Chine, plus de 60 % en Inde, 86 % en Afrique du Sud, etc. Compte tenu de son abondance et de son faible coût, de très nombreux autres pays l'utilisent toujours, y compris en Europe (l'Allemagne et la Pologne en sont les plus gros consommateurs sur le continent) ;

* La mobilité (terrestre, maritime et aérienne) est assurée à environ 96 % par le pétrole, comme déjà souligné au § 2 ;

Ces quelques chiffres suffisent à montrer l'ampleur du défi que représente la réduction massive de l'usage des énergies carbonées, à l'origine des première, deuxième et troisième révolutions industrielles, mais toujours omniprésentes dans la consommation mondiale. Elles devraient encore représenter, si l'on en croit les prévisions de l'AIE (Agence Internationale de l'Énergie), plus de 70 % de l'énergie primaire utilisée en 2040 dans le monde, malgré la croissance des énergies renouvelables anticipée par l'Europe et d'autres pays ;

Comme déjà dit ci-dessus, l'humanité a jusqu'à présent « empilé » les usages des sources d'énergie utilisées depuis la première révolution industrielle mais n'a encore jamais remplacé complètement l'une d'entre elles par une nouvelle énergie. Il y a pour cela deux raisons de fond qui cumulent leurs effets : l'accroissement du niveau de vie des pays développés depuis deux siècles et l'explosion démographique mondiale avec des populations passées depuis un siècle de moins de 2 à près de 8 milliards d'individus, qui pour une grande partie d'entre eux partent d'un niveau de consommation très bas, et aspirent à augmenter leur niveau de vie, donc leur consommation énergétique qui en est le moteur.

Cette incapacité à se débarrasser de sources « historiques » d'énergie doit donc être méditée alors que, pour la première fois dans son histoire, l'humanité se trouve confrontée à la nécessité d'en réduire drastiquement certaines, à savoir les énergies fossiles (sauf à capter et séquestrer le CO₂ émis, comme

déjà mentionné dans l'introduction), sachant que ces sources d'énergie sont encore de très loin les plus utilisées à l'heure actuelle dans le monde.

C'est dire à quel point passer de la situation actuelle à une consommation énergétique largement décarbonée est un défi qu'il sera très difficile de relever et qui ne se fera pas en quelques décennies, en dépit des illusions de certains : c'est une dure réalité qui se profile.

- Qu'en est-il de la France dans ce contexte mondial ?

Elle occupe une position fortement contrastée :

* Extrêmement favorable dans le domaine de la production d'électricité dont plus de 90 % est produite sans émettre de CO₂ : grâce au nucléaire (entre 70 % et 75 %) ; à l'hydraulique (12 % en moyenne) ; à un peu de biomasse (2 %) ; enfin à l'éolien et solaire photovoltaïque (près de 9 % en 2019). Ce qui en fait le « grand pays électrique » qui émet de loin le moins de CO₂ par kWh produit au monde (il n'est dépassé que par la Norvège qui produit 96 % de son électricité grâce à l'hydraulique et par la Suède qui produit plus de 40 % de son électricité grâce au nucléaire et plus de 55 % à base d'hydraulique et autres énergies renouvelables. Mais ce sont des pays beaucoup moins peuplés, ayant des ressources naturelles hydrauliques très abondantes par habitant ;

* « Moyenne » dans d'autres domaines (comparée à d'autres pays européens) notamment dans la mobilité (massivement dépendante des énergies fossiles) et l'habitat, pénalisé à la fois par son niveau d'isolation thermique insuffisant et par l'usage d'énergies fossiles. C'est donc dans ces deux domaines cruciaux que les réductions des émissions de CO₂ et partant, les investissements nécessaires associés, doivent porter en priorité absolue si l'on veut vraiment réduire les émissions de CO₂ du pays. À un moindre degré, l'industrie et l'agriculture (secteur particulièrement important en France) ne doivent pas non plus être oubliées dans les émissions de gaz à effet de serre.

* Quelques chiffres et leurs conséquences : si l'on divise l'énergie totale consommée par la France (toutes origines confondues : pétrole, gaz, électricité, bois énergie, etc.) par le nombre de ses habitants, on arrive au chiffre moyen de 45 000 kWh par habitant et par an, soit encore $45\ 000/365 \approx 123$ kWh par habitant et par jour !

Cette quantité d'énergie considérable est utilisée pour satisfaire l'ensemble des besoins en chauffage, électricité, consommation d'eau, de produits agricoles et industriels, de services de santé et tertiaires, de déplacements, etc. En un mot pour satisfaire les besoins d'un habitant d'un pays développé, sans compter l'énergie incluse dans les produits importés.

Si l'on compare ce chiffre à l'énergie moyenne journalière qu'un humain peut produire par sa seule force musculaire (0,075 kW pendant 8 heures) soit 0,6 kWh par jour, on arrive à la conclusion que chaque français consomme environ $123/0,6 \approx 200$ fois plus d'énergie qu'il ne pourrait en produire avec ses muscles : tout se passe comme si chaque français disposait de 200 « esclaves énergétiques » comme les nomme judicieusement Jean-Marc Jancovici.

Ces chiffres donnent une idée de notre dépendance, pour ne pas dire addiction à l'énergie, mais aussi de la difficulté à réduire l'usage de cette dernière. Il faudra pourtant le faire pour les sources d'énergies fossiles : réduire leur usage réduit mécaniquement les émissions de CO₂. Trois moyens complémentaires peuvent être mis en œuvre pour y parvenir :

* Réaliser des progrès d'efficacité énergétique qui consistent, grâce à l'amélioration des technologies, à obtenir le même service en consommant moins d'énergies fossiles. Mais ces progrès sont lents, de moins de 1 % par an depuis des décennies. Il faudra les accélérer ;

* Remplacer dès que possible les énergies fossiles par des énergies peu carbonées ;

* Réaliser d'indispensables efforts de sobriété en réduisant raisonnablement certaines consommations énergétiques, ce qui relève de changements de comportements individuels et collectifs. Ces derniers supposeront cependant l'acceptation des populations, qui n'est raisonnablement envisageable que si ces efforts ne remettent pas profondément en cause nos modes de vie. En résumé :

Seul le recours à des sources d'énergies non émettrices de CO₂ peut donc permettre de conserver un niveau de consommation énergétique suffisamment élevé pour ne pas remettre en cause notre mode de vie de pays développé tout en préservant le climat. Ce qui réduit fortement l'éventail des possibles.

6 – Revue des solutions énergétiques possibles et de leurs caractéristiques

Un point fait consensus : l'électricité apparaît comme le vecteur énergétique majeur d'une économie largement décarbonée, ce pour deux raisons :

* Elle peut être produite à partir d'une grande variété de sources primaires d'énergie non émettrices de CO₂ (au-delà des émissions dues à la fabrication, l'entretien et le démantèlement des installations de production d'électricité, mais ces émissions dites « grises » sont très faibles par rapport à celles qui résultent de la combustion des énergies fossiles),

* C'est le vecteur énergétique le plus universel, qui peut de ce fait être transformé en pratiquement toutes les autres formes d'énergie : mécanique, thermique, chimique (avec notamment la production par électrolyse, sans émettre de CO₂, d'un autre vecteur énergétique, l'hydrogène), électromagnétique (ondes de différentes fréquences, y compris lumineuses), etc.

Parmi les applications de l'électricité les plus efficaces, on citera le chauffage par pompes à chaleur (qui permettent d'extraire du sous-sol ou de l'atmosphère 3 à 4 fois plus d'énergie thermique que l'on ne consomme d'énergie électrique). Elles sont appelées à un grand développement pour le chauffage et la climatisation. Dans le domaine de la mobilité, on citera la traction électrique actuellement réservée au rail qui émet en France 50 à 70 fois moins de CO₂ que les autres moyens de locomotion, terrestres, aériens ou maritimes, et qui devra être étendue aux moyens routiers avec les véhicules électriques à batteries.

La question se résume donc en grande partie à produire de l'électricité sans émettre de CO₂ et à l'utiliser dans un maximum d'applications, soit stationnaires (ce qui est très facile) soit mobiles (ce qui l'est beaucoup moins en dehors des réseaux ferrés électrifiés) et passe alors soit par le stockage dans des batteries électrochimiques pour les voitures électriques, soit par le recours au vecteur hydrogène produit par électrolyse pour les transports terrestres lourds et à plus long terme les transports maritimes et aériens.

Mais la condition impérative est que l'électricité soit exclusivement fabriquée à partir d'énergies primaires utilisables sans émettre de CO₂ (au-delà des émissions produites lors de la fabrication des machines de production, comme déjà souligné ci-dessus). Or, il n'existe que deux types d'énergies primaires répondant à ces critères : l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables (il est cependant possible d'obtenir un résultat similaire en utilisant des énergies carbonées à la condition impérative de capter et séquestrer le CO₂ émis lors de leur usage afin de ne pas le rejeter dans l'atmosphère, comme évoqué dans l'introduction).

- Une distinction fondamentale à noter entre énergies primaires de « stock » et énergies primaires de « flux »

* Les énergies primaires de « stock » sont celles dont la source peut être stockée avant utilisation (charbon, fioul, gaz, uranium). Elles peuvent alors être transformées en électricité à la demande, lorsqu'on en a besoin pour satisfaire la consommation. On obtient de la sorte une électricité dite « pilotable ». Quelques énergies primaires renouvelables, en particulier l'hydraulique ou la biomasse, le permettent également dans la limite du renouvellement annuel de leurs stocks respectifs d'eau accumulée derrière les barrages ou de biomasse. Mais la seule qui puisse y répondre à la bonne échelle des besoins est l'énergie nucléaire.

* Les énergies de « flux » sont celles dont la source est fluctuante. Si l'on excepte l'énergie des marées (prévisible mais très difficile à capter, voir plus loin) les énergies primaires de « flux » les plus abondantes sont celles du vent (due à sa vitesse instantanée) et du soleil (due à la puissance de son rayonnement instantané). Elles ont par contre deux caractéristiques défavorables pour la production d'électricité : contrairement aux énergies de « stock » qui sont très concentrées, elles sont diffuses, et nécessitent donc de grandes superficies pour obtenir des puissances importantes. Mais surtout, elles sont fortement dépendantes des conditions météorologiques : pour l'éolien, la puissance délivrée peut varier en un temps très court dans des proportions considérables de la pleine puissance à pratiquement zéro. Quant au photovoltaïque, il est plus régulier mais subit le rythme implacable jour-nuit et les variations saisonnières été-hiver : en France métropolitaine, la production hivernale est en moyenne 4 fois inférieure à celle de l'été, alors que la demande est maximale l'hiver. Cette variation saisonnière implique de faire du stockage d'énergie intersaisonnier pour utiliser en hiver les surplus de l'été.

En résumé, ces sources d'énergie sont fatales, fortement variables et intermittentes et produisent de l'électricité indépendamment des besoins des consommateurs. Elles sont dites « non pilotables » pour cette raison. Mieux que de longs discours, les figures ci-après montrent que les productions éoliennes (Figure 1) ou photovoltaïque (Figure 2) sont sauf exception décorréées de la demande et de ses variations, c'est-à-dire incapables de répondre seules aux besoins (Figure 3). Elles sont en outre plus variables que les besoins et peuvent disparaître (c'est le cas systématiquement pour le photovoltaïque tous les soirs) ou se réduire à des puissances négligeables pour l'éolien comme le montre bien la Figure 1. De plus, comme ne le montre pas cette figure (la situation ne s'est pas produite en novembre 2020), les productions éoliennes peuvent rester très faibles (inférieures à 10 % de la puissance installée) pendant plusieurs jours consécutifs : ce fut par exemple récemment le cas entre le 1^{er} et le 16 septembre 2020 et entre le 1^{er} et le 8 janvier 2021. A l'inverse, les éoliennes doivent être stoppées pour des raisons de sécurité par grands vents (pour des vitesses de vent supérieures à 90 à 110 km/h selon leur conception).

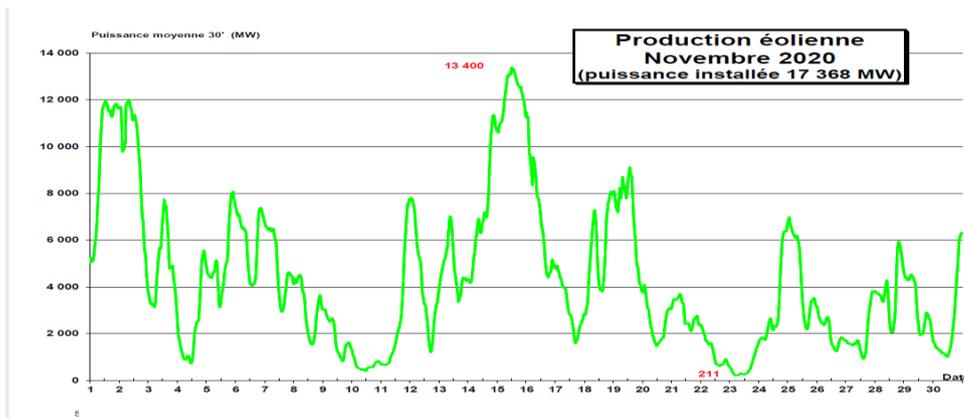


Figure 1 : exemple type de production éolienne en novembre

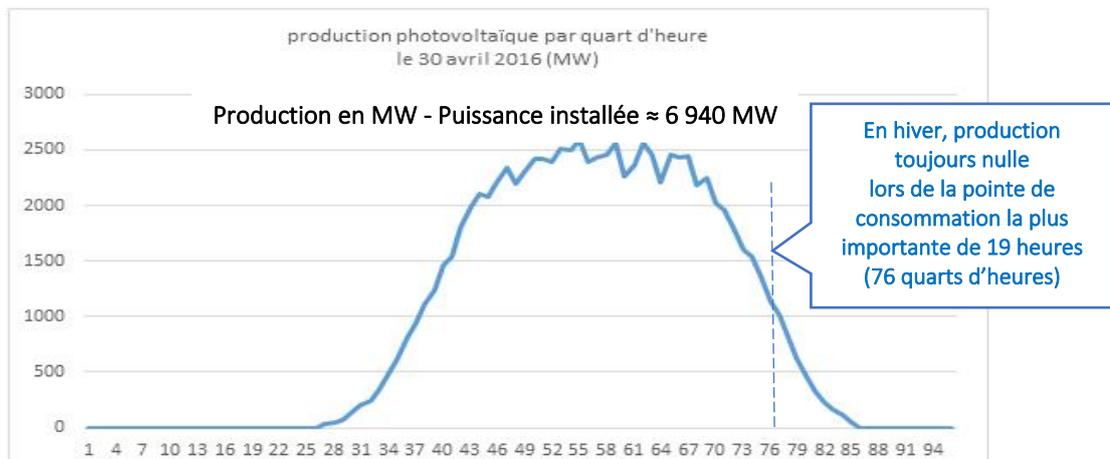


Figure 2 : exemple type de production photovoltaïque en avril

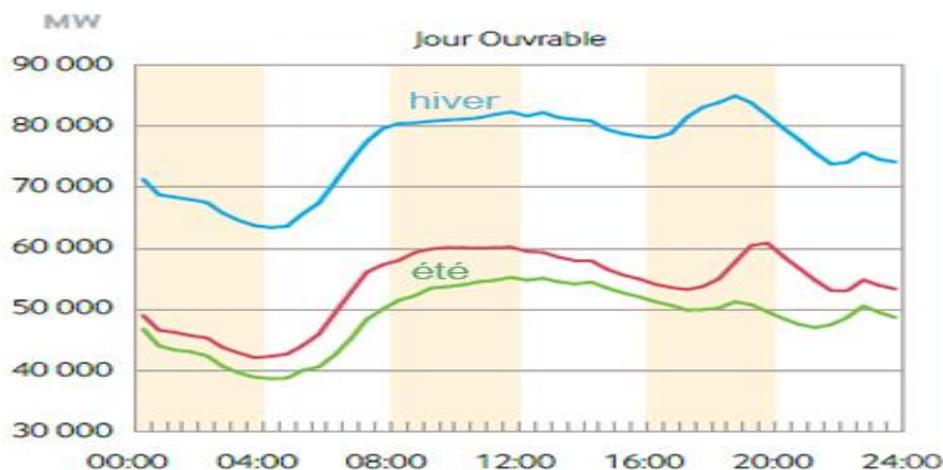


Figure 3 : variations moyennes types de la demande journalière à différentes saisons (demi-saison pour la courbe rouge)

Ces figures appellent plusieurs commentaires :

° La variabilité de la production d'électricité éolienne est bien représentée par la Figure 1, qui n'a rien d'exceptionnel, la plupart des mois de l'année ayant des profils similaires. Ainsi, avec une puissance installée de 17 368 MW (donc déjà l'équivalent de 17 réacteurs nucléaires de 1 000 MW) les éoliennes du territoire métropolitain français affichent une puissance réelle instantanée qui varie ce mois-là de 211 MW (soit 1,2 % de la puissance installée) à 13 400 MW (soit 77 % de la puissance installée) alors que l'automne est en général favorable à l'éolien. De plus, on observe des variations très importantes en l'espace d'une journée ou moins (par exemple entre le 2 et le 3 novembre, on passe brutalement de 12 000 à 3 000 MW, soit une perte considérable de 9 000 MW).

° La production photovoltaïque varie journalièrement comme représentée par la Figure 2, ici pour une période moyennement ensoleillée (un peu plus d'un mois après l'équinoxe de printemps). Sa variabilité est plus faible que celle de l'éolien et surtout plus prévisible. Mais la variation est forte à la montée et à la descente du soleil chaque jour. Et cette production est totalement absente l'hiver lors de la pointe de consommation du soir à 19h (Figure 3, courbe bleue) heure à laquelle il fait nuit depuis longtemps, et même en demi-saison (figure 2 et courbe rouge sur la figure 3) où la production photovoltaïque est faible à cette heure tardive.

° La Figure 3 montre les variations moyennes typiques de la demande journalière à différentes saisons : hiver (courbe bleue) ; demi-saison (courbe rouge) ; été (courbe verte). Il est facile de voir en comparant les trois figures 1 ; 2 ; 3 que les productions éoliennes et photovoltaïques ont peu de chances de coïncider avec la demande... sauf en été lorsque le photovoltaïque alimente les climatiseurs !

- Une conséquence structurante pour le système électrique : les productions éoliennes et photovoltaïques sont incapables de satisfaire seules la demande d'électricité

Comme déjà esquissé dans l'introduction, ces productions doivent être impérativement complétées par d'autres moyens pour pallier leur très grande variabilité et leur intermittence. Quatre types de solutions sont possibles :

* Utiliser des moyens pilotables de soutien-secours pour pallier les manques ou insuffisances de vent et/ou de soleil ;

* Stocker l'électricité éolienne et photovoltaïque quand elle est en excès pour la déstocker quand on en a besoin. Mais comme l'électricité ne se stocke pas en tant que telle (c'est aussi une énergie de « flux ») il faut la transformer en une autre forme d'énergie qui soit stockable : énergie hydraulique dans des STEP (Stations de transfert d'énergie par pompage) qui sont les moyens de stockage les plus importants à l'heure actuelle, mais qui ne suffiront pas à l'avenir ; énergie électrochimique dans des batteries ; énergie chimique obtenue par production d'hydrogène par électrolyse.

On aboutit ainsi à des chaînes de transformation [Électricité → Stock d'énergie → Électricité] permettant d'obtenir par déstockage une électricité qui devient pilotable puisqu'elle est alors produite à partir d'un stock d'énergie artificiellement constitué ;

* Importer de l'électricité depuis les pays voisins... à condition qu'ils aient des possibilités d'exportation quand on en a besoin, ce qui n'est pas le cas la nuit pour le photovoltaïque (il fait nuit à peu près en même temps à quelques heures près dans les pays européens) ni à certaines périodes pour l'éolien, notamment en cas d'anticyclone qui peut recouvrir une grande partie de l'Europe occidentale. Pour pallier ce risque les allemands envisagent par exemple d'importer de pays d'Afrique du Nord non pas de l'électricité mais de l'hydrogène qui serait produit par électrolyse en quantités très importantes à partir d'électricité photovoltaïque dans ces pays ;

* Enfin, adapter partiellement la consommation aux productions éoliennes et solaires, ce qui implique une révolution dans les habitudes de consommation. Cette possibilité, nécessairement limitée en volume, est déjà utilisée pour certaines consommations industrielles qui s'effacent volontairement durant les heures de pointe hivernales les plus fortes, mais cette pratique devrait être étendue à une grande partie des consommations domestiques. Ceci bien sûr avec l'accord des consommateurs, jusqu'à présent habitués à avoir de l'électricité disponible en permanence : révolution culturelle en vue...

Entrer dans le détail de ces solutions n'est pas possible dans le cadre de cette note générale, mais on retiendra qu'à l'exception des importations, couramment utilisées depuis longtemps mais rendues de plus en plus précieuses à terme par la montée en puissance des productions éoliennes et photovoltaïques, elles sont toutes : soit complexes à mettre en œuvre, quand elles impliquent des acceptations sociétales ; soit coûteuses, tout particulièrement les solutions de stockage/déstockage d'énergie ; soit les deux à la fois.

En résumé, les moyens de production non pilotables éoliens et photovoltaïques ne rendent absolument pas le même service économique que les moyens pilotables. Cette réalité enlève toute signification à la comparaison directe des coûts de production « aux bornes des machines » de production d'électricité. Seuls les coûts du système électrique complet, capable de rendre un service à peu près identique à celui de moyens pilotables grâce aux différentes compensations décrites ci-dessus, ont un sens économique (voir plus loin, tableau 7 du § 9).

- Un défi supplémentaire : quand les moyens de production éoliens et photovoltaïques deviennent dominants, ils impliquent une rupture technologique majeure dans le fonctionnement des systèmes électriques

Le sujet est très technique et a des implications sécuritaires très fortes. Sans entrer dans des explications complexes, les réseaux triphasés actuels qui fournissent l'électricité de tous les pays du monde de façon très efficace ont été inventés voici 130 ans par Nikola Tesla. Les machines qui produisent l'électricité sont les alternateurs synchrones, entraînés par des turbines de différents types : hydrauliques, à vapeur, à gaz. Or, ces alternateurs possèdent une propriété fondamentale extrêmement précieuse : ils sont capables de s'autosynchroniser naturellement une fois couplés aux réseaux, et de fonctionner ensuite tous ensemble de façon très stable à la même fréquence (de 50 Hz en Europe). Cette propriété les rend insensibles aux perturbations électromagnétiques de faible énergie. De plus, l'inertie apportée par les rotors de ces alternateurs et des turbines qui les entraînent, amortit les variations brutales de fréquence. Ces systèmes ont donc des niveaux de sécurité très élevés directement liés aux lois de la physique.

Par contre, les éoliennes et les panneaux photovoltaïques ne sont pas raccordés aux réseaux par des alternateurs mais par des onduleurs électroniques de puissance. Ces onduleurs ne restent pas couplés naturellement au réseau, il faut les commander en permanence pour ce faire par des moyens extérieurs numérisés de contrôle et de commande qui fonctionnent à basse énergie. Il en résulte que ces moyens de production sont beaucoup plus sensibles aux perturbations électromagnétiques, y compris de faible puissance, et surtout sont potentiellement cyber-vulnérables du fait de leur numérisation généralisée, ce qui n'est pas le cas des alternateurs. De plus, les onduleurs n'apportent aucune inertie au réseau.

Pour l'instant, ces caractéristiques défavorables des onduleurs ont des impacts limités dans la mesure où les systèmes électriques restent encore majoritairement gouvernés par des alternateurs synchrones, les taux de pénétration d'électricité apportée par des onduleurs étant limités. Mais la question se pose pour des systèmes que l'on voudrait faire fonctionner avec « 100 % d'énergies renouvelables » dans lesquels les alternateurs deviendraient alors ultra-minoritaires (seuls resteraient essentiellement les alternateurs entraînés par des turbines hydrauliques). On changerait alors totalement de technologie pour les systèmes électriques, avec des conséquences encore inconnues (Pour plus de précisions sur ce sujet, voir article de l'auteur de ces lignes intitulé : *Électricité « 100 % renouvelable » : solution miracle ou utopie mortifère ?* paru pour la première fois dans le numéro 654 de Janvier-Février 2021 de *La Revue de l'Énergie*).

Dans un rapport d'étude commun avec l'AIE publié le 27 janvier 2021, RTE a d'ailleurs clairement indiqué que la faisabilité de tels systèmes dépendait de « quatre ensembles de conditions strictes et cumulatives » dont la première est précisément la viabilité de systèmes électriques de très grande taille fonctionnement majoritairement avec des onduleurs.

Il faut aussi faire face au « défi de la multitude » constitué par le très grand nombre d'onduleurs de petite ou moyenne puissance dont le fonctionnement doit être coordonné en temps réel.

Enfin, comme le note RTE dans le rapport précité : « Il n'existe aucune démonstration de la faisabilité d'une intégration très poussée d'EnR variables comme l'éolien et le photovoltaïque sur un grand système électrique, et des enjeux techniques nouveaux sont forcément appelés à émerger ».

La conclusion, majeure, est donc sans ambiguïté : il n'existe à ce jour aucune certitude concernant la faisabilité réelle de grands systèmes électriques fonctionnant avec « 100 % d'énergies renouvelables ».

Et si de tels systèmes voyaient le jour, leur indispensable cyber-protection soulèverait des questions redoutables : sera-t-il possible de garantir cette dernière de façon absolue, sachant que toute vulnérabilité pourrait entraîner des conséquences potentiellement dévastatrices allant jusqu'à la mise dans le noir du pays ?

- Un autre critère fondamental est à prendre en compte : l'ordre de grandeur des sources d'énergies primaires disponibles

C'est un autre critère essentiel quand il s'agit de produire de l'électricité à la très grande échelle requise pour répondre aux besoins d'un pays développé de la taille de la France. Sans oublier que cette production doit avoir un coût soutenable, l'électricité étant déjà un bien de première nécessité et étant appelée à accroître son rôle en devenant le vecteur énergétique dominant qui devrait représenter beaucoup plus de la moitié de toute l'énergie consommée en France en 2050 et 70 à 80 % à la fin de ce siècle selon l'AIE. C'est pourquoi il est indispensable d'inclure également cet aspect majeur dans la revue des énergies renouvelables existantes.

Il existe une grande variété de ces énergies : énergie hydraulique ; bioénergies ; énergie du vent ; énergie du soleil ; énergie des mers (marémotrice, des courants sous-marins, des vagues, thermique en fonction de la profondeur) ; énergie géothermique ; etc. Mais elles ne sont pas toutes, ni abondantes, ni faciles à utiliser, ni économiquement compétitives et soutenables. Revue de détail :

* L'énergie hydraulique : c'est l'une des premières à avoir été utilisée par l'humanité et c'est toujours l'énergie renouvelable la plus utilisée dans le monde. C'est aussi la première source d'énergie qui a été historiquement utilisée dans les premiers réseaux d'électricité, à la fin du XIX^{ème} siècle. Cela tient à sa facilité d'utilisation et à ses grandes qualités : elle dépend certes de la pluviométrie, donc des conditions météorologiques annuelles et saisonnières, mais l'énergie de l'eau est soit naturellement concentrée dans les fleuves et rivières par les bassins versants, soit naturellement stockée dans les lacs d'altitude, naturels ou rendus artificiels par des barrages. Ces derniers permettent de produire une électricité totalement pilotable. Il en va encore en grande partie de même sur les fleuves et rivières en modulant leur marnage amont, ce qui est possible dans beaucoup de cas. De plus, contrairement au vent ou au soleil dont les puissances instantanées peuvent varier très rapidement dans de grandes proportions (parfois en quelques minutes à quelques heures), les débits des fleuves et rivières varient lentement sauf exception (crues soudaines), à des échelles de temps généralement hebdomadaires et au-delà, ce qui donne des productions stables et très prévisibles.

Malheureusement, beaucoup de pays dont la France ont déjà équipé depuis très longtemps leurs sites favorables et les possibilités d'extensions de la « grande hydraulique » sont essentiellement limitées à quelques rares sites potentiels nouveaux et à l'amélioration des machines de production d'électricité sur les sites équipés pour en augmenter la production. On peut au total en espérer 10 à 15 % de puissance et d'énergie en plus, ce qui est toujours très intéressant, mais reste limité. Quant à la « micro-hydraulique » (petites puissances disponibles allant de quelques kW à quelques dizaines de kW) elle est peu exploitée, car règlementairement très complexe à développer pour des raisons de protection de la biodiversité des cours d'eau et assez peu rentable. Elle doit de ce fait être subventionnée. Mais son potentiel global au niveau du pays, quoique faible (environ 1 GW), n'est pas totalement négligeable dans le contexte actuel et sa relative continuité de production est intéressante.

En résumé, l'hydraulique est une énergie renouvelable extrêmement utile car majoritairement pilotable (totalement pour l'hydraulique de lacs, en grande partie pour l'hydraulique d'éclusée sur les fleuves, en faisant varier le marnage amont). Elle est aussi à la bonne échelle des besoins (grande hydraulique) et économique. Améliorer son utilisation chaque fois que c'est possible pour en tirer le maximum d'électricité est très pertinent. Le problème en France étant comme déjà dit que les possibilités d'extension sont limitées à environ 15 %, soumises dans certains cas à l'acceptabilité sociétale locale et aux limitations dues aux autres usages de l'eau.

* La biomasse : notons d'abord que le CO₂ émis par la combustion de la biomasse (bois énergie, déchets végétaux, biométhane, etc.) est conventionnellement considéré comme non réchauffant pour le climat car le CO₂ ainsi émis a été préalablement absorbé dans l'atmosphère par les végétaux utilisés. La limite de cette convention étant que la combustion est immédiate alors que la repousse d'une quantité équivalente de nouvelle biomasse est décalée dans le temps, plus ou moins selon le type de végétaux utilisés. Il n'en reste pas moins que le bilan est très différent de celui de la combustion de matières fossiles extraites du sous-sol, dont le carbone passe définitivement de ce dernier à l'atmosphère et augmente (pour une durée de plus d'un siècle) le taux de CO₂ net de cette dernière, accroissant l'effet de serre.

Qu'en est-il des quantités disponibles ? Dans une perspective durable, elles sont par définition limitées au renouvellement annuel, la biomasse n'étant rien d'autre que de l'énergie solaire concentrée dans les plantes grâce à la photosynthèse, avec un rendement de transformation très faible inférieur à 1 %. Il s'ensuit que même dans un pays fortement doté de surfaces forestières et agricoles, la quantité de biomasse durablement utilisable est et restera limitée au regard des besoins d'énergie du pays. Ceci ne signifie pas qu'elle est négligeable, mais que cette ressource doit être utilisée parcimonieusement.

De ce point de vue, transformer la biomasse en électricité n'est pas forcément la meilleure solution possible dans tous les cas, compte tenu des pertes de rendement de transformation ; elle est intéressante dans le cas d'incinération d'ordures ménagères ou de déchets végétaux qui sont difficilement utilisables autrement. Elle peut aussi l'être si l'électricité produite sert à alimenter des pompes à chaleur. Utiliser la biomasse pour les besoins directs de chaleur (bois énergie) ou dans la mobilité (biométhane) peut avoir davantage de sens, mais n'est pas n'importe où : le bois énergie notamment est utilisable de façon rationnelle dans un rayon limité à 150 km environ autour de sa ressource naturelle pour limiter les émissions de CO₂ des transports. Mais sa combustion émet des particules fines qui doivent être piégées pour ne pas polluer l'atmosphère dans les milieux sensibles (urbains, vallées montagneuses encaissées, notamment).

En résumé, la biomasse est une source d'énergie non négligeable mais limitée en croissance. Son usage pourrait cependant doubler d'ici 2050, d'un peu moins de 200 TWh actuellement à un peu plus de 400 TWh selon les prévisions de la SNBC (Stratégie nationale bas carbone), ce qui reste néanmoins modeste. Et ses usages directs se limitent à très peu d'applications énergétiques directes.

* Les énergies marines : elles sont de quatre types :

° L'énergie des marées : sa captation suppose de disposer d'un marnage très important, dépassant largement 10 m, rare sur la planète. Elle demande en outre des ouvrages colossaux pour retenir l'eau des marées hautes et pouvoir turbiner son flux à la montée et à la descente des marées. La première centrale dans le monde, construite sur l'estuaire de la Rance en France, a bénéficié de conditions très favorables : l'estuaire de la Rance est peu large et le marnage du lieu peut atteindre 13 à 14 m, même si son utilisation moyenne n'est que de 7 m environ. La centrale, d'une puissance respectable de 240 MW, a été mise en service en 1966 et est restée de loin la plus puissante au monde pendant 45 ans jusqu'à la mise en service en 2011 d'une centrale de 254 MW en Corée du Sud. Toutes les autres centrales existantes ont de faibles puissances, de l'ordre de quelques dizaines de MW, même si des projets plus importants existent. Mais les très importants ouvrages nécessaires à leur fonctionnement ont des impacts environnementaux négatifs, ce qui freine leur développement.

En résumé, l'énergie marémotrice n'apparaît pas comme une solution développable à grande échelle, elle devrait surtout concerner à l'avenir de petites installations de quelques dizaines de MW dans les lieux les plus propices.

° L'énergie des courants marins : cette énergie, créée par les courants sous-marins dus aux flux et reflux des marées est importante en France, essentiellement en certains endroits des côtes bretonnes et normandes. Son potentiel théorique est de l'ordre de 3 000 MW. Mais les premières expérimentations se sont révélées très décevantes car l'énergie captée (qui varie comme le cube de la vitesse des courants) s'annule toutes les 6 heures et n'est importante que durant moins de 20 % du temps. De plus, le milieu marin dégrade rapidement les turbines sous-marines : la corrosion et les dépôts de coquillages dégradent les profils des turbines donc leurs rendements, ce qui coûte très cher en pertes d'énergie et en entretien, pour une électricité in fine très chère.

En résumé, les espoirs qui étaient mis dans ces énergies sont pour le moment fortement déçus.

° L'énergie des vagues : sa captation fait l'objet de nombreux essais depuis de nombreuses années, notamment avec des flotteurs articulés dont les mouvements relatifs actionnent des vérins dont les mouvements permettent de récupérer de l'énergie. Mais tout cela est mécaniquement très complexe, semble peu efficace et coûte cher. On est pour l'instant plus proche des romans de Jules Verne que d'installations industrielles. Une autre solution, nettement plus simple, donc qui semble plus rationnelle et est réputée moins coûteuse, consiste à utiliser le mouvement ascendant et descendant de la houle pour comprimer de l'air qui entraîne une turbine. Les essais actuels sont encourageants, mais les réalisations industrielles ne sont pas encore disponibles.

En résumé, il faudra sans doute encore beaucoup de R&D et de réalisations préindustrielles avant de pouvoir juger de l'intérêt technico-économique réel de ces solutions.

° L'énergie thermique des mers, dans les zones tropicales : il s'agit ici d'exploiter les différences de température entre la surface (un peu plus de 30 °C) et le fond de la mer qui est à environ 4 °C à grande profondeur. Mais faire fonctionner une machine thermodynamique avec une différence de température d'environ 30 °C conduit à un rendement de Carnot extrêmement faible et implique de traiter des débits d'eau très importants pour disposer d'une puissance significative, impliquant des tuyauteries de grandes dimensions, ces différents facteurs coûtant très cher.

En résumé, plus encore ici, on est très loin de démonstrateurs industriels ayant une quelconque viabilité économique.

* La géothermie profonde haute température : elle ne doit pas être confondue avec la géothermie « de surface » où de la chaleur est captée à faible profondeur (quelques centaines de m au grand maximum) et utilisée, soit comme « source froide » pour les pompes à chaleur, soit directement sous forme d'eau chaude si sa température est suffisante, tout en restant inférieure à 90 °C. La géothermie profonde haute température se caractérise par des profondeurs beaucoup plus importantes (en général supérieures à 1000 m, pouvant aller jusqu'à 2000, 3000 m, voire plus) et des températures supérieures à 150 °C, pouvant aller jusqu'à 350 °C, qui seules permettent de produire de l'électricité avec un rendement acceptable.

La solution peut être intéressante, mais elle dépend avant tout de la qualité et de l'abondance de la ressource géothermique, qui n'existe à grande échelle que dans les régions du monde dotées d'un volcanisme récent. Un exemple existe depuis longtemps en Guadeloupe avec la centrale de Bouillante, qui pompe à un peu plus de 1000 m une eau à 250 °C et 90 bars qui permet de disposer de vapeur à 160 °C en surface pour faire tourner une turbine. Mais sa puissance est modeste (23 MW) même si elle est intéressante à l'échelle de l'île.

En France métropolitaine, la ressource géothermique profonde est limitée à quelques régions, dont l'Alsace, où ses premières exploitations ont posé des problèmes sérieux : trois projets de géothermie profonde développés près de Strasbourg ont dû être suspendus et une centrale existante arrêtée (définitivement ?) suite au déclenchement de mini-séismes de magnitude allant jusqu'à 3,5 sur l'échelle de Richter, enregistrés fin décembre 2020. Toutes ces installations étaient pourtant de faible puissance. L'enquête est en cours au moment où ces lignes sont écrites.

En résumé, ces aléas ne signifient probablement pas la fin de l'exploitation de la géothermie profonde en France métropolitaine, mais il est certain que cette source d'énergie restera en tout état de cause très marginale à l'échelle des besoins du pays. La France n'est pas l'Islande et ses seulement 365 000 habitants qui vivent au milieu des geysers...

* L'éolien : au-delà de l'hydraulique, première énergie renouvelable actuellement utilisée dans le monde mais au potentiel de croissance limité dans les pays développés, dont la France, l'éolien fait partie avec le solaire des deux sources d'énergie renouvelable ayant, au moins « sur le papier », un potentiel théorique d'extension très important. La réalité est nettement moins idyllique car cette source d'énergie présente à terre de nombreux inconvénients bien identifiés : impact sur les paysages naturels ou historiques, impact sur la santé des riverains les plus proches, impact sur la diversité aviaire (beaucoup d'oiseaux et de chauve-souris sont tués par les pales chaque année), dévalorisation de l'habitat proche, consommation importante de matériaux rares et moins rares comme le cuivre mais qui sont extrêmement demandés par l'industrie électrique, ce dernier inconvénient concernant également les éoliennes en mer de façon encore plus importante.

Les pays ayant des zones côtières se dirigent de plus en plus vers les éoliennes en mer, soit « posées » (en fait, posées ou ancrées sur les fonds marins) soit « flottantes » ces dernières permettant d'aller beaucoup plus loin des côtes. Ces éoliennes marines ont pour intérêt de bénéficier de conditions de vent plus favorables (absences de reliefs ralentissant les vents) et de permettre d'utiliser des machines de bien plus grandes tailles donc plus productives. Mais elles ont aussi des inconvénients qui peuvent être majeurs pour les autres usages de la mer, notamment la pêche. Le cas actuellement le plus scandaleux est celui du parc éolien en cours d'installation dans la baie de Saint-Brieuc, juste à côté des zones de pêche de la coquille Saint-Jacques. Il suscite à juste titre une opposition majeure des quelque 180 pêcheurs actifs dans la baie et, cerise sur le gâteau, il produira l'électricité éolienne en mer de loin la plus chère de France à 155 €/MWh, sans compter le coût du raccordement au réseau, de l'ordre de 20 €/MWh. Enfin, les éoliennes en mer utilisent dans leurs alternateurs des aimants permanents qui utilisent des matériaux rares en très grandes quantités.

* Le solaire photovoltaïque : toujours « sur le papier » son potentiel de développement est très important. On distingue 3 types d'installations photovoltaïques : en toitures résidentielles, de très petites surfaces ; en toitures commerciales (industrielles, tertiaires ou agricoles), de surfaces nettement plus importantes ; au sol, en très grandes surfaces autorisant des tailles industrielles. En France métropolitaine, c'est bien sûr dans le sud ensoleillé que cette source d'énergie est la plus pertinente (l'ensoleillement est 60 % plus important sur la Côte d'Azur qu'à Lille). Mais elle souffre de deux handicaps :

° Son intermittence jour-nuit, qui peut-être aggravée en journée par des baisses voire des disparitions de production dues à des conditions atmosphériques défavorables : pluie, neige, brouillards denses, passages nuageux, ciel plombé ;

° Sa variabilité saisonnière : la production photovoltaïque est en moyenne 4 fois plus importante en été qu'en hiver à la latitude de la France, alors que les besoins sont au plus haut en hiver ! Cette non-coïncidence imposera à terme de disposer de moyens de stockage d'énergie inter-saisonniers, qui ne peuvent être basés que sur des gaz combustibles (hydrogène notamment). La situation est très différente pour des installations situées dans une large zone intertropicale dans laquelle la variabilité intersaisonnière est beaucoup plus faible, voire pratiquement inexistante, ce qui limite les besoins de stockage d'énergie à la journée : des batteries électrochimiques suffisent alors pour disposer d'électricité la nuit, toute l'année, ce qui est beaucoup plus simple et beaucoup moins cher qu'un stockage inter-saisonnier.

Concernant les coûts, le photovoltaïque en toitures résidentielles est et restera de loin le plus cher car il relève d'activités d'installation artisanales. Par contre, les grandes centrales au sol de tailles industrielles affichent les coûts les plus bas. Mais elles requièrent de très grandes superficies de plus en plus difficiles à trouver en France car elles ne doivent pas empiéter sur les surfaces agricoles ou les forêts. Elles suscitent pour ces raisons des oppositions montantes.

* Le solaire thermodynamique : il ne s'agit plus ici d'utiliser l'effet photoélectrique comme avec le photovoltaïque, mais la chaleur du rayonnement solaire concentrée par un très grand nombre de miroirs sur une cible (généralement située au sommet d'une tour) qui est alors portée à haute température (de 400 à près de 1 000 °C). La chaleur ainsi captée est ensuite utilisée dans un cycle eau-vapeur classique qui entraîne une turbine et un alternateur.

L'un des avantages de cette technologie est la possibilité d'accumuler de la chaleur dans la cible durant la journée pour la restituer en partie durant la nuit. Elle requiert cependant des espaces importants pour obtenir une puissance élevée et est coûteuse en investissements du fait des milliers de miroirs nécessaires qui doivent suivre la course du soleil. Elle n'apparaît donc compétitive par rapport au photovoltaïque que dans les régions très fortement ensoleillées ayant de grands espaces disponibles (ces centrales existent essentiellement aux Etats-Unis, en Espagne et au Maroc, notamment). Cette technologie est plutôt citée ici pour mémoire, car elle est inadaptée à la France métropolitaine qui n'est pas assez ensoleillée et aux îles DOM-TOM plus ensoleillées mais qui manquent de grands espaces disponibles.

* Dernier moyen possible pour produire de l'électricité décarbonée : comme déjà évoqué, utiliser les énergies fossiles mais associées au Captage et à la Séquestration du Carbone (CSC en abrégé ou encore CCS en anglais pour Carbon Capture and Storage ou parfois CCUS lorsque le CO₂ est utilisé). Il ne s'agit plus ici d'utiliser des énergies primaires naturellement non émettrices de CO₂ comme le nucléaire ou les énergies renouvelables, mais de continuer à recourir à la combustion des énergies fossiles à condition de l'associer au captage du CO₂ émis afin d'éviter son rejet dans l'atmosphère.

Les technologies de captage sont connues depuis un certain temps, la plus usuelle utilisant l'absorption du CO₂ par des solvants. Elle est cependant très énergétivore et peine à déboucher industriellement pour des raisons de rentabilité du fait de ses coûts énergétiques et d'investissement élevés. Mais la difficulté la plus importante est sans doute le stockage de très grandes quantités de CO₂ dans des conditions de sûreté garanties, du fait de la dangerosité des fuites de ce gaz. Notons que selon certains sondages d'opinion réalisés à l'étranger, ce dernier point suscite des oppositions sociétales, tout particulièrement semble-t-il en Allemagne.

Les possibilités de stockage sont essentiellement envisagées dans deux types de structures géologiques : les aquifères salins profonds et les réservoirs d'hydrocarbures déplétés ou en cours d'exploitation (pour extraire davantage de pétrole dans ce cas). La France ne dispose pas de ces derniers (ou très peu) mais un projet mené par plusieurs pétroliers dont Total Énergies va être engagé en mer du Nord avec l'objectif de séquestrer 3 Mt de CO₂ par an dans un premier temps. Mais le projet implique également de résoudre la question du transport de ce gaz, sans doute via un réseau dédié nécessairement coûteux.

Cette technologie est néanmoins fortement mise en avant par le GIEC et l'AIE actuellement, probablement au vu de l'importance des productions d'électricité à partir de charbon qui persistent dans le monde. Elle est cependant encore très loin d'être parvenue à un stade de maturité industrielle et viabilité économique comparable à celui du nucléaire. Pour la France, elle ne constitue donc pas une option de base face à un mix comportant une forte proportion de nucléaire, mais on ne peut sans doute pas l'exclure à titre d'ultime secours pour des compléments de production. Elle serait alors logiquement basée sur l'usage du gaz naturel, le moins coûteux des combustibles fossiles à décarboner.

7 – Une question vitale pour le futur état de développement de la France : quelle consommation d'électricité faut-il viser en 2050 ?

Une large consultation publique sur les perspectives du système électrique en 2050 organisée par RTE au premier trimestre 2021 incluait la question centrale des besoins en électricité jugés nécessaires en 2050. Cette consultation a mis en évidence des divergences d'appréciation extrêmement fortes qui ont révélé un clivage profond et irréductible entre :

- Les tenants déclarés du « tout renouvelable »

Ils prônent pour 2050 des consommations d'électricité de l'ordre de grandeur de la consommation actuelle (475 TWh en 2019, dernière année « normale »), soit une consommation d'environ 500 TWh pour tous les scénarios qui en résultent. On trouve en particulier dans cette catégorie : l'ADEME ; de nombreuses associations militantes comme NégaWatt, Réseau Action Climat, Sortir du nucléaire, Greenpeace, etc. (qui ont en commun leur récusation du nucléaire) ; des syndicats professionnels comme le SER, France énergie éolienne, Enerplan, etc. (qui promeuvent l'éolien et/ou le solaire photovoltaïque) ; des industriels du gaz, renouvelable ou... pas, présenté comme la solution idéale de compensation de l'intermittence du vent et du soleil et surtout, ce qui n'est pas dit, qui se tient en embuscade comme solution de recours aux pénuries majeures d'électricité qui résulteront de façon certaine de ces scénarios.

- Ceux qui considèrent comme essentiels tout ou partie des avantages irremplaçables du nucléaire pour : lutter efficacement contre le dérèglement climatique ; garantir la sécurité d'alimentation en électricité et une consommation suffisante du pays ; assurer son indépendance énergétique

On trouve dans cette catégorie : l'Académie des Sciences ; l'Académie des Technologies ; de nombreuses sociétés savantes et/ou associations comme la SFEN, Sauvons Le Climat, PNC-France, le Céréme, IED, etc. ; des représentants de l'industrie (CFE, etc.) ; des représentants des syndicats de salariés, etc.

Les consommations d'électricité envisagées en 2050 par ces différents organismes sont beaucoup plus élevées. Quatre d'entre elles parmi les plus élevées sont rappelées dans le tableau 1 ci-dessous et comparées aux anticipations réalisées en Allemagne et au Royaume-Uni, ces pays étant en Europe les plus comparables à la France en terme de tailles et de systèmes électriques (on notera que ces prévisions incluent les consommations d'électricité nécessaires à la production d'hydrogène par électrolyse, à des niveaux qui sont variables selon les scénarios considérés).

PAYS	Consommations	Consommation observée en 2019 (TWh)	Consommation anticipée en 2050 (TWh)	Augmentation relative entre 2019 et 2050 (%)	Production requise (*) hors import/export en 2050 (TWh)
FRANCE					
	* Académie des Sciences (1)	} ≈ 475	≈ 700 à 900	≈ + 47 à + 89 %	≈ 753 à 978
	* Académie des Technologies (2)		≈ 840	≈ + 77 %	≈ 903
	* Estimation Négatep (3)		≈ 810 à 845	≈ + 70 à + 78 %	≈ 871 à 909
	* Estimation Henri Prévot (4)		≈ 863	≈ + 82 %	≈ 928
	<u>Moyenne des estimations hautes</u>		≈ <u>833</u>	≈ <u>+ 75 %</u>	≈ <u>896 arrondis à 900</u>
ALLEMAGNE		≈ 571	> 1 000 (5)	≈ + 70 % (6)	> 1 075
ROYAUME-UNI		≈ 326	> 600	≈ + 80 % (6)	> 645
RTE (hypothèse de référence)		≈ 475	≈ 645 (7)	≈ + 36 %	≈ 693

Tableau 1 : estimations les plus élevées comparées aux anticipations en Allemagne et au Royaume-Uni

(*) Compte tenu de pertes réseau prises égales à 7 % environ

(1) « L'apport de l'énergie nucléaire dans la transition énergétique, aujourd'hui et demain » – Avis publié le 8 Juillet 2021

(2) « Perspective de la demande française d'électricité d'ici 2050 » – Avis publié le 10 Mars 2021

(3) « Comment individuellement et collectivement diminuer les émissions de CO₂ de la France d'ici 2050-60 » – Edition 2021 – Scénario Négatep de Sauvons Le Climat (SLC)

(4) « La neutralité carbone sans trop de contraintes ni de dépenses » – Par Henri Prévot – La Revue de l'énergie N° 656 – Mai/Juin 2021

(5) Il n'existe pas au moment où ces lignes sont écrites de prévision officielle de l'Etat allemand. Néanmoins, divers organismes ont publié des estimations convergentes. Le Think Tank AGORA Energiewende a estimé récemment une consommation brute de 1017 TWh en 2045, date à laquelle l'Allemagne vise la neutralité carbone

(6) Augmentations relatives citées par RTE pour ces pays lors de la réunion de concertation publique dite CPSR organisée par RTE le 25 juin 2021. Il s'agit ici d'ordres de grandeur approximatifs

(7) Consommation de référence citée lors de la réunion de concertation publique précitée. Cette consommation de référence est issue de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC) légèrement augmentée par RTE à 645 TWh. Elle est assortie de 5 variantes (voir ci-dessous)

Les projections pour la France du tableau 1 sont crédibilisées d'une part par les avis des deux Académies, celle des Sciences et celle des Technologies et d'autre part par les comparaisons internationales avec les deux pays d'Europe cités. On soulignera en effet qu'en dépit de consommations de départ sensiblement différentes en 2019, les augmentations relatives des consommations entre 2019 et 2045-2050 sont très proches pour les trois pays considérés.

Les projections pour la France du tableau 1 sont crédibilisées d'une part par les avis des deux Académies, celle des Sciences et celle des Technologies et d'autre part par les comparaisons internationales avec les deux pays d'Europe les plus comparables à la France. On soulignera en effet qu'en dépit de consommations de départ sensiblement différentes en 2019, les augmentations relatives des consommations entre 2019 et 2050 sont très proches pour les trois pays considérés et se situent en ordre de grandeur vers + 70 à + 80 %, à comparer au ± 0 % d'augmentation des tenants du « tout renouvelable ».

On ajoutera que les cinq variantes étudiées par RTE autour de la consommation de référence de 645 TWh apportent de l'eau au moulin d'une consommation réaliste très sensiblement supérieure à celle de la référence. Ces variantes sont résumées dans le tableau 2 ci-dessous :

Variante	Sobriété	Réindustrialisation forte	Efficacité énergétique dégradée	Electrification + / -	Hydrogène +
Consommation (TWh)	550 à 600	700 à 750	700 à 730	580 à 720	680 à 770

Tableau 2 : variantes affichées par RTE lors de la réunion de concertation publique du 25 juin 2021

On soulignera que sur ces cinq variantes, une seule (la variante Sobriété, supposant comme son nom l'indique des efforts de sobriété renforcés) anticipe une consommation inférieure à celle de la référence

de 645 TWh mais qui reste néanmoins très sensiblement supérieure aux estimations d'environ 500 TWh des tenants du « tout renouvelable ».

Quant aux quatre variantes supérieures à la référence, la plus haute va jusqu'à 770 TWh. L'approche de RTE par variantes qui recouvrent un éventail des possibles beaucoup plus large que la seule référence est une avancée indéniable. Cependant, on ne peut exclure que certaines de ces variantes aient des effets croisés. Notamment, la variante Efficacité énergétique dégradée présente un risque transverse susceptible d'affecter une ou plusieurs des autres variantes. Il serait indispensable que RTE étudie en profondeur les combinaisons possibles et réalistes de ces variantes afin d'en déterminer l'impact sur la consommation globale, qui pourrait alors dépasser très sensiblement les 770 TWh maximum affichés pour se rapprocher très fortement des estimations hautes du tableau 1. C'est un point fondamental eu égard au caractère vital de cette consommation pour l'avenir du pays.

- De l'illusion à la réalité, l'enjeu crucial du choix de société en 2050

Il n'est pas inutile de rappeler une nouvelle fois que l'énergie est littéralement le « sang » de toute société développée : sans énergie suffisante, tout dysfonctionne avec des conséquences délétères considérables que l'on observe concrètement dans les pays en développement qui souffrent de pénuries énergétiques. Sans entrer dans les chiffres, quelques observations non exhaustives peuvent être faites concernant :

* Le fonctionnement de l'Etat et du pays. Peut-on imaginer un instant que la défense nationale, la sécurité civile, les services d'urgence dont les pompiers et le SAMU, le système hospitalier, le service de l'eau, les télécommunications, les transports publics, etc. souffrent de pénuries durables ou récurrentes d'énergie ? Il suffit d'observer les conséquences de la panne des appels de numéros d'urgence d'ORANGE survenue le 2 juin 2021, qui pourrait avoir provoqué jusqu'à six décès, pour se faire une idée des conséquences beaucoup plus larges et graves sur la vie du pays qu'entraîneraient des manques d'énergie ;

* L'agriculture. Elle ne peut absolument plus se passer de mécanisation, donc d'énergie. Le secteur mobilisait 10 millions d'agriculteurs en 1945 et ne parvenait pas à nourrir le pays, qui n'est devenu auto-suffisant que dans les années 1970. Il ne reste actuellement plus que 400 000 exploitants agricoles aidés par 250 000 ouvriers mais la France est devenue un grand pays exportateur de produits agricoles ;

Il est certain qu'on ne reviendra pas en arrière, tout simplement parce que c'est impossible à la fois physiquement et économiquement : un travailleur de force fournit au mieux 0,6 kWh par jour (voir § 5). S'il travaille 230 jours par an cela fait environ 138 kWh/an. Payé au SMIC, il coûte à son employeur environ 22 000 €/an. Le coût du kWh d'énergie musculaire humaine est donc de $22\ 000/138 \approx 160$ €/kWh. Coût exorbitant, environ 1 000 fois plus élevé que celui du kWh d'électricité domestique, de l'ordre de 0,16 €/kWh. Revenir massivement à la bêche et à la faucille est donc une illusion qui rendrait les aliments à la fois rares et hors de prix.

Or, les puissances des engins agricoles s'échelonnent de 50 à 300 kW voire davantage. Il faudra donc bien les alimenter, soit par l'électricité (via des batteries), soit par de l'hydrogène électrolytique, soit par des biocarburants, pour remplacer le gazole actuellement utilisé ;

* Les travaux publics et le bâtiment. Ces deux secteurs mobilisent plus de 1,4 million de travailleurs. La conclusion est la même que pour l'agriculture, il est impossible de revenir en arrière. Les travaux publics notamment, qui mobilisent un peu plus de 300 000 travailleurs, utilisent des engins mécaniques encore plus puissants que l'agriculture, couramment 500 à 1 000 kW et parfois plus. Mais chacun d'eux remplace des centaines ou des milliers de travailleurs de force. Cette évolution est également devenue irréversible sauf à arrêter la majorité des constructions et rendre inabordable les coûts des rares travaux publics et des bâtiments et logements qui subsisteraient. Il faudra donc là encore alimenter tous ces engins mécaniques avec de l'électricité pour les moins puissants et de l'hydrogène ou des biocarburants pour les autres ;

* L'industrie. Sa relance est un sujet majeur poussé à bon escient par les pouvoirs publics. Mais elle ne pourra se faire de façon efficace et compétitive qu'en utilisant massivement des robots et en numérisant les processus. Or, la France est très en retard en matière de robotisation : avec 177 robots industriels pour 10 000 emplois dans l'industrie, elle se situe au 10^{ème} rang mondial seulement pour cet indicateur, derrière notamment la Corée du Sud (855), le Japon (364), l'Allemagne (346), l'Italie (212) et l'Espagne (191). Or, les robots et la numérisation consomment de l'électricité, dont les besoins devraient donc fortement augmenter.

Plus globalement, l'industrie lourde fortement consommatrice d'énergie va devoir substituer massivement l'électricité ou l'hydrogène électrolytique à d'autres formes d'énergie actuellement utilisées, par exemple le charbon dans la fabrication de l'acier, actuellement à l'origine de 9 % des émissions mondiales de CO₂.

* L'habitat et la mobilité. Ces deux secteurs pèsent actuellement le plus dans les émissions de CO₂. Ils vont devoir utiliser massivement l'électricité (ou l'hydrogène ou les biocarburants pour certains transports lourds) en lieu et place des énergies fossiles encore très importantes dans l'habitat et ultradominantes dans la mobilité.

En conclusion et malgré tous les progrès d'efficacité et les efforts de sobriété qui devront accompagner ces évolutions vers l'électrification massive des usages, envisager de ne pas augmenter la consommation d'électricité d'ici 2050 impliquerait de réduire drastiquement les consommations actuelles d'énergie pour pouvoir se passer des sources fossiles. Or, ces dernières pèsent encore très lourd dans la consommation actuelle : en 2019, l'énergie finale consommée était apportée à 69,3 % par les sources fossiles, à 22,3 % par l'électricité et à 8,4 % par la biomasse. Avec une consommation d'électricité inchangée et malgré un doublement postulé de la biomasse, il ne resterait en 2050 qu'environ $22,3 + 2 \times 8,4 \approx 39$ % de l'énergie finale disponible en 2019 sans les combustibles fossiles. Cette perspective d'effondrement énergétique enlève toute crédibilité aux prévisions minimalistes des tenants du « tout renouvelable ».

En réalité, le débat sur l'énergie est donc également politique dans l'esprit de certains promoteurs de très faibles consommations et concerne le type de société envisagé en 2050, pour ne pas dire la pérennité de notre civilisation développée actuelle. Or, comme les chiffres du § 8 ci-dessous le montrent, celle-ci dépendra du maintien à long terme de l'option nucléaire à un niveau élevé car c'est la seule énergie connue à ce jour apte à garantir à la fois de façon certaine une production d'électricité décarbonée indispensable pour lutter efficacement contre le réchauffement et climatique et une alimentation en énergie suffisante du pays indispensable pour ne pas remettre profondément en cause le statut de pays développé de la France.

Il est temps de sortir des illusions, utopies et objectifs décroissantistes qui ne disent pas leur nom et d'informer clairement les citoyens sur les conséquences dévastatrices d'un abandon du nucléaire qui conduirait de façon certaine à un manque massif d'énergie et à un changement profond de société.

8 – Quels mix électriques pour 2050 ?

- Quand atteindre « 100 % d'énergies renouvelables » à l'horizon 2050 se heurte à la dure réalité des chiffres

* Commençons par l'Europe (UE27) : après près de 20 ans d'investissements massifs dans l'éolien et le photovoltaïque (pour un montant de plus de 1 000 milliards d'euros, dont près de la moitié dépensés par l'Allemagne), ces deux sources combinées n'ont produit qu'un peu moins de 15 % en 2018 selon les dernières statistiques publiées en 2020 par EUROSTAT, résumées dans le tableau 3 suivant. Elles ont certes continué à progresser en 2019 et 2020 et dépassent donc un peu 15 % actuellement.

Production par source d'énergie	Hydraulique	Biomasse solide	Eolien (terre + mer)	Photovoltaïque (PV)	Sous-total éolien + PV	Total production
UE 27 2018						
TWh	370,7	100,2	320,5	115,0	435,5	2 941,5
% du total	12,6 %	3,4 %	10,9 %	3,9 %	14,8 %	100 %

Tableau 3 : part des productions renouvelables en Europe en 2018

Ce tableau montre que l'on est encore très loin du « 100 % d'énergies renouvelables » : à production globale d'électricité inchangée, il faudrait en effet déjà multiplier par près de 6 les productions éoliennes et photovoltaïques de 2018 pour atteindre cet objectif, compte tenu des productions hydrauliques et de biomasse, autres sources renouvelables non intermittentes qui représentent ensemble environ 16 % de la production.

Or, la consommation et donc la production d'électricité en 2050 sont appelées à augmenter fortement en Europe, comme en France. Il faudrait donc multiplier la part des productions éoliennes + photovoltaïques par un facteur très nettement supérieur à 6 à cette échéance pour atteindre l'objectif de 100 %.

* Dans le cas de la France, il est possible de se faire une première idée indicative à partir des scénarios provisoires établis par RTE pour 2050, qui seront finalisés à l'automne 2021 et vont de 100 % d'énergies renouvelables (scénario M0) à un maximum de 50 % de nucléaire (scénario N03) pour une consommation nette de référence de 645 TWh et une production nécessaire de 693 TWh (voir tableau 1 ci-dessus).

Ces estimations provisoires de RTE pour le scénario tout renouvelable M0 sont comparées aux productions constatées en 2019 (source : RTE également) dans le tableau 4 ci-dessous. Elles sont complétées par les estimations dérivées du scénario M0 pour une production portée à 900 TWh (voir tableau 1) en conservant les mêmes parts relatives pour l'éolien à terre, l'éolien en mer et le photovoltaïque que pour M0 :

Production par source d'énergie	Hydraulique	Biomasse solide	Nucléaire	Sources fossiles	Eolien à terre	Eolien en mer	Photo-voltaïque (PV)	Sous-total éolien + PV	Total production
<u>Réf. 2019</u>									
TWh	59,4	9,7	379,2	41,6	33,9	0	11,6	45,5	535,4
% du total	11,1 %	1,8 %	70,8 %	7,7 %	6,3 %	0 %	2,3 %	8,5 %	100 %
<u>M0 2050</u>									
TWh	≈ 62	≈ 20	0	0	≈ 146	≈ 215	≈ 250	≈ 611	≈ 693
% du total	9 %	3 %			21 %	31 %	36 %	88 %	100 %
Facteur multiplicatif de la production entre 2019 et 2050	≈ 1,04	≈ 2	0	0	≈ 4,3	---	≈ 21,6	≈ 13,4	≈ 1,29
<u>Mix 900 TWh 2050</u>									
TWh	≈ 62	≈ 20	0	0	≈ 195	≈ 288	≈ 335	≈ 818	≈ 900
% du total	7 %	2 %			22 %	32 %	37 %	91 %	100 %
Facteur multiplicatif associé	≈ 1,04	≈ 2	0	0	≈ 5,8	---	≈ 29	≈ 18	≈ 1,68

Tableau 4 : facteurs multiplicatifs nécessaires des productions intermittentes entre 2019 et 2050 pour le scénario provisoire M0 de RTE et pour un mix dérivé de M0 porté à 900 TWh

Ces résultats appellent plusieurs remarques :

° Concernant le scénario M0 :

- La production éolienne + photovoltaïque devrait être multipliée par environ **13,4** entre 2019 et 2050 pour satisfaire la consommation, ce qui représente une augmentation considérable ;

- RTE a fait le choix dans ce scénario de faire porter l'essentiel de la production d'abord sur le PV (avec ≈ 208 GW installés) dont la production devrait être multipliée par 21,6 par rapport à celle de 2019, ensuite sur l'éolien en mer (avec ≈ 72 GW installés). Cela permet de limiter à 4,3 par rapport à 2019 (avec ≈ 74 GW installés) le facteur multiplicatif de l'éolien à terre, qui est le moyen qui suscite le plus d'oppositions ;

- Si l'on compte en nombre d'éoliennes, il faudrait passer : en mer, de zéro éolienne actuellement à un peu plus de 7 000 éoliennes de puissance unitaire moyenne supposée d'environ 10 MW ; à terre, d'un peu plus de 8 000 éoliennes actuellement à environ 35 000 à puissance unitaire moyenne inchangée (un peu supérieure à 2 MW) ou à plus de 17 000 éoliennes de puissance unitaire doublée (autour de 4 MW) mais alors beaucoup plus hautes, ayant par conséquent des impacts négatifs beaucoup plus importants (visuels, bruits, distances de dévalorisation des biens immobiliers encore plus notables, etc.).

- D'autre part, et c'est une faiblesse majeure supplémentaire, un tel mix ne permettrait pas d'assurer la sécurité d'alimentation lors des épisodes hivernaux de très forte consommation, notamment lors des pointes de 19 h alors qu'il fait nuit depuis longtemps (donc avec une puissance photovoltaïque nulle) et que le vent peut par ailleurs devenir très faible. Dans l'hypothèse plus que raisonnable d'une pointe de consommation nette de 90 GW soit une production nécessaire de $90/0,93 \approx 97$ GW pour tenir compte des pertes réseau, les seules puissances certaines car pilotables seraient d'environ 18 GW pour l'hydraulique (maximum historique observé qui évoluera peu) et 2 GW pour la biomasse, soit un total de l'ordre de 20 GW seulement. Le déficit de puissance à combler serait alors abyssal à $97 - 20 = 77$ GW !

À ce niveau de déficit, les diverses contributions existantes (éoliennes dont la production est aléatoire ; importations ; déstockages d'énergie de tous types ; effacements de consommations industrielles et

domestiques ; etc.) ne pourraient en aucun cas suffire, d'autant plus que les importations seraient très vraisemblablement rendues très difficiles voire impossibles parce que les pays voisins subiraient les mêmes conditions climatiques en cas de manque de vent sur une partie de l'Europe occidentale. Il faudrait donc disposer, compte tenu des marges de sécurité nécessaires, d'au moins 60 GW de moyens pilotables de production de pointe fonctionnant au gaz, non inclus à ce stade dans le scénario provisoire de RTE. De plus, pour ne pas émettre de CO₂, ces gaz devraient essentiellement être des gaz de synthèse, en premier lieu de l'hydrogène produit par électrolyse, dont la production augmenterait à nouveau les besoins en électricité, nécessitant davantage d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques...

° Concernant le mix dérivé de M0 porté à 900 TWh :

- Les productions du scénario M0 devraient être encore augmentées d'environ un tiers pour atteindre la production requise, ce qui aggraverait les conclusions ci-dessus. Ainsi, le parc [éolien + photovoltaïque] M0 qui cumule 344 GW de puissance installée selon RTE, soit environ trois fois la puissance totale installée du parc de production actuel, devrait passer à environ 460 GW, soit 4 fois la puissance totale installée de ce même parc.

- Par contre, la puissance installée pilotable n'évoluerait pas, à 20 GW. La consommation de pointe ayant toutes chances d'augmenter, le déficit de puissance à combler augmenterait donc encore.

En résumé, nul besoin d'être un expert du domaine pour constater que le scénario « tout renouvelable » M0 est déjà irréaliste : où mettrait-on toutes ces éoliennes et tous ces panneaux photovoltaïques ? Quelle en serait l'acceptabilité sociétale à ce niveau exorbitant ? Espérer desservir une consommation égale ou supérieure à celle de M0 relève donc de la fiction.

La dure réalité des chiffres est donc sans appel : un mix « 100 % renouvelable » est structurellement incapable de satisfaire une consommation élevée. Il ne peut en aucun cas alimenter à la bonne échelle la France en 2050.

- Les atouts d'un mix comportant une production nucléaire la plus élevée possible

C'est ce que montre par comparaison le scénario (provisoire) N03 de RTE comprenant 52 GW de nucléaire pour assurer la même production de 693 TWh, résumé dans le tableau 5, ligne N03 2050, ci-dessous :

Production par source d'énergie	Hydraulique	Biomasse solide	Nucléaire	Sources fossiles	Eolien à terre	Eolien en mer	Photo-voltaïque (PV)	Sous-total éolien + PV	Total production
<u>Réf. 2019</u>									
TWh	59,4	9,7	379,2	41,6	33,9	0	11,6	45,5	535,4
% du total	11,1 %	1,8 %	70,8 %	7,7 %	6,3 %	0 %	2,3 %	8,5 %	100 %
<u>N03 2050</u>									
TWh	≈ 62	≈ 20	≈ 347	0	≈ 90	≈ 84	≈ 90	≈ 264	≈ 693
% du total	9 %	3 %	50 %		13 %	12 %	13 %	38 %	100 %
Facteur multiplicatif de la production entre 2019 et 2050	≈ 1,04	≈ 2	≈ 0,91	0	≈ 2,7	---	≈ 7,8	≈ 5,8	≈ 1,29
<u>Mix 900 TWh 50 % nucléaire</u>									
TWh	≈ 62	≈ 20	≈ 450	0	≈ 125	≈ 117	≈ 125	≈ 368	≈ 900
% du total	7 %	2 %	50 %		14 %	13 %	14 %	41 %	100 %
Facteur multiplicatif associé	≈ 1,04	≈ 2	≈ 1,19	0	≈ 3,7	---	≈ 10,8	≈ 8,1	≈ 1,68
<u>Mix 900 TWh 70 % nucléaire</u>									
TWh	≈ 62	≈ 20	≈ 631	0	≈ 64	≈ 59	≈ 64	≈ 187	≈ 900
% du total	7 %	2 %	70 %		7,1 %	6,8 %	7,1 %	21 %	100 %
Facteur multiplicatif associé	≈ 1,04	≈ 2	≈ 1,5	0	≈ 1,9	---	≈ 5,5	≈ 4,1	≈ 1,68

Tableau 5 : mix [nucléaire + renouvelables] comportant une part croissante de nucléaire

Comme précédemment, ce scénario N03 peut être facilement extrapolé à des contributions nucléaires plus importantes en conservant par ailleurs les mêmes parts relatives entre éolien à terre, éolien en mer et photovoltaïque. L'exercice est fait dans l'hypothèse d'une production de 900 TWh comprenant 50 % de nucléaire (avec 68 GW installés) et 70 % de nucléaire (avec 95 GW installés) cette dernière proportion étant celle de ces dernières années en France, comprise entre 70 et 75 % selon les périodes. Ces résultats appellent plusieurs remarques :

° Concernant le scénario N03 : avec 50 % de nucléaire (soit 52 GW installés) il apporte déjà des avancées considérables par rapport au scénario M0 :

- La production pilotable annuelle moyenne atteint la proportion de 50 % (nucléaire) + 12 % (hydraulique + biomasse) soit au total 62 %, au-delà du talon d'environ 60 % requis pour ne pas nécessiter de changement technologique majeur du système électrique selon l'étude d'EDF R&D : « *Technical and economic analysis of the european electricity system with 60 % RES* » - By Alain Burtin and Vera Silva.

- Les besoins en capacités renouvelables intermittentes par rapport au scénario M0 sont réduites de 57 % (facteur de 5,8 au lieu de 13,4) dont 37 % pour l'éolien à terre (facteur de 2,7 au lieu de 4,3). Ces réductions sont très importantes même si ce résultat montre qu'il faut aller au-delà de 50 % de nucléaire pour réduire plus fortement les capacités des moyens intermittents qui doivent encore produire 38 % de l'énergie, taux qui sera difficile à atteindre (nombre très élevé d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques).

° Concernant les mix dérivés de N03 portés à 900 TWh :

- Avec 50 % de nucléaire, la contribution nécessaire des productions intermittentes (41 %, correspondant à environ 200 GW d'éoliennes à terre, d'éoliennes en mer et de photovoltaïque) redevient très élevée du fait du niveau de production nécessaire et pose donc des difficultés de réalisation en termes de nombres d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques à installer. Elle n'est donc pas idéale.

- Passer à 70 % de nucléaire réduit la contribution des productions intermittentes à 21 %. Cette réduction (division par 2, à 100 GW d'éoliennes à terre, d'éoliennes en mer et de photovoltaïque) procure en outre une grande souplesse dans le choix des répartitions relatives entre ces différents moyens, notamment pour réduire la contribution de l'éolien à terre et la reporter sur l'éolien en mer et le photovoltaïque.

- Enfin, les capacités nucléaires sécurisent très fortement les puissances disponibles lors des pointes de consommation hivernales de 19h, les plus importantes. L'estimation est présentée dans le tableau 6 ci-dessous dans l'hypothèse d'une pointe de consommation nette de 90 GW soit $90/0,93 \approx 97$ GW à produire compte tenu des pertes réseau. Toutes les valeurs sont exprimées en GW :

Capacité nucléaire installée	0 (1)	52 GW (2)	68 GW (3)	95 GW (4)
Apport à la pointe (95 % de la capacité installée)	0	≈ 49	≈ 65	≈ 90
Apport maximum hydraulique + biomasse	≈ 20	≈ 20	≈ 20	≈ 20
Apport total moyens pilotables	≈ 20	≈ 69	≈ 85	≈ 110
Déficit en puissance de pointe à combler (5)	≈ 77	≈ 28	≈ 12	< 0 (6)

Tableau 6 : déficits en puissance de pointe à combler en fonction de la capacité nucléaire installée

(1) Scénario provisoire RTE M0 « 100 % renouvelable »

(2) Scénario provisoire RTE N03

(3) (4) Mix 900 TWh avec respectivement 50 % et 70 % de nucléaire

(5) Par tous moyens disponibles : contributions éoliennes... s'il y a suffisamment de vent, importations, déstockages d'énergie, effacements de consommations, etc. Comme souligné plus haut, un tel déficit implique d'utiliser environ 60 GW de moyens pilotables de pointe pour assurer la sécurité d'alimentation dans le scénario M0 et probablement davantage dans le cas d'une consommation de 900 TWh. Ces moyens sont très fortement réduits voire deviennent inutiles en présence d'une contribution nucléaire élevée.

(6) Probables possibilités d'exportations même en cas de demande de pointe élevée.

En résumé, ces chiffres conduisent à des conclusions majeures sur l'intérêt des mix à fort taux de nucléaire comparées à des mix « tout renouvelables » :

Entre un scénario « tout renouvelable » et un scénario comportant au moins 50 % de nucléaire et au-delà, les différences de faisabilité et de services rendus sont considérables.

En outre, augmenter la part du nucléaire jusqu'à 70 % (proportion expérimentée jusqu'à 75 % pendant ces dernières décennies en France) ne présente que des avantages pour alimenter le pays, en limitant le nombre d'éoliennes nécessaires et les aléas des conditions météorologiques.

- Sur la trajectoire vers 2050, l'enjeu majeur de la sécurité d'alimentation en électricité d'ici 2030-2035 et au-delà

S'intéresser à cette étape intermédiaire sur la trajectoire de 2050 est également essentiel. En effet, la loi LTECV (loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte) et sa déclinaison dans la PPE (Programmation pluriannuelle annuelle de l'énergie) qui la met en œuvre sur la période 2019-2028, ont programmé l'arrêt supplémentaire de 12 réacteurs nucléaires de 900 MW entre 2028 et 2035. Cela conduirait à priver le pays d'environ 11 GW de puissance nucléaire s'ajoutant aux 1,8 GW de la centrale de Fessenheim arrêtée en 2020 pour raisons purement politiques et aux 3 GW de puissance des centrales à charbon dont l'arrêt est programmé fin 2022. Ce sont donc près de 16 GW de moyens pilotables dont 13 GW de nucléaire qui disparaîtraient ainsi en France entre la fin 2019 et 2035 si la PPE était mise en œuvre. Si l'arrêt du charbon est cohérent avec la lutte contre le réchauffement et le dérèglement climatique, celui du nucléaire revient à se priver du moyen le plus efficace pour atteindre ce but et met en outre en cause la sécurité d'alimentation en électricité du pays. C'est une double faute.

Ces fermetures programmées interviendraient en effet dans le contexte de plus en plus incertain d'une politique européenne exclusivement axée sur le « tout éolien + photovoltaïque » qui conduit l'Europe, si elle persiste dans cette voie, vers des pénuries sévères d'alimentation en électricité plusieurs fois par hiver. De nombreux pays voisins (Allemagne, Belgique, Italie, Espagne, Suisse, etc.) se sont déjà collectivement engagés, tels les moutons de Panurge, à supprimer d'ici 2035 plus de 75 GW de moyens pilotables, nucléaires ou au charbon, ce qui est considérable. La France ne pourra donc pas ou très peu compter sur eux pour être secourue, car ils subiront la plupart du temps des pénuries similaires quasi-simultanées de production éolienne, sans disposer de capacités pilotables de secours qui auront été largement réduites.

Dans ce contexte, arrêter prématurément 11 GW de moyens nucléaires qui pourraient parfaitement fonctionner 10 à 20 ans de plus en toute sûreté affaiblirait considérablement la capacité du pays à assurer sa propre alimentation en électricité dans les périodes critiques. Ceci d'autant plus que selon les études prévisionnelles de RTE, il n'y aura pas d'ici 2030-2035 de moyens de stockage de masse (utilisant l'hydrogène) disponibles à la bonne échelle, alors qu'ils constituent le complément naturel des manques de durables vent. Ces fermetures prématurées sont par ailleurs aberrantes sous deux autres aspects :

° Elles vont totalement à l'encontre du dernier rapport du GIEC publié le 9 août 2021 qui alerte sur l'accélération et l'aggravation du réchauffement climatique : fermer pour raisons politiques des moyens de production qui sont les plus efficaces pour lutter contre ce réchauffement est irresponsable,

° Elles ne préparent pas la nécessaire trajectoire vers les objectifs de 2050.

Il est donc urgent de revenir sur la programmation de la PPE actuelle qui consiste à détruire ce qui marche sans disposer de moyens de remplacement offrant le même service. Démarche irresponsable à trois égards : sécurité d'alimentation dans un contexte de plus en plus incertain et risqué ; lutte contre le réchauffement climatique alors que cela revient à se priver du moyen le plus efficace dans ce but ; enfin préparation de l'avenir à l'horizon 2050 qui aura besoin du maximum de capacités nucléaires.

- Deux risques potentiels sans commune mesure qui peuvent être évités simultanément par un choix « sans regrets »

Anticiper la consommation d'électricité à 30 ans de distance avec une grande précision est évidemment illusoire. C'est d'autant plus problématique que le système électrique d'un pays comme la France est très complexe et ne peut évoluer qu'avec des constantes de temps qui se comptent en décennies plutôt qu'en années. Cette grande inertie d'adaptation a une conséquence lourde : une erreur de prévision par défaut

n'aura pas du tout les mêmes conséquences économiques, sociétales et sociales qu'une prévision par excès, autrement dit ces erreurs de prévision ont des conséquences profondément « dissymétriques » :

* Une anticipation erronée par défaut sera nécessairement longue à rattraper car mettre de nouveaux moyens de production en service avec les nécessaires extensions ou renforcements associés des réseaux implique des délais de procédures administratives sujettes à des recours suivis des délais de construction et de mise en service plus ou moins importants selon les technologies. Mais l'expérience montre que la somme de ces deux types de délais se compte dans tous les cas en plusieurs années. Malgré les ajustements à la marge des prévisions au fil du temps, la conséquence prévisible d'une sous-estimation est donc un risque de pénurie susceptible de durer jusqu'à plusieurs années qui affecterait profondément une grande partie de l'économie et précariserait fortement l'alimentation en électricité des citoyens avec des coupures tournantes. En un mot, il s'agit d'un risque à la fois généralisé et durable, à très fort impact potentiel sur la vie du pays tout entier. C'est une situation que beaucoup de pays en développement ont subie, et qui a fait récemment son apparition pour de courtes durées en Californie, État pourtant très riche des États-Unis, qui a trop misé sur l'énergie photovoltaïque au détriment des moyens pilotables.

* Une anticipation erronée par excès présente au contraire un risque très limité pour au moins quatre raisons :

° Il est beaucoup plus facile et rapide d'infléchir à la baisse qu'à la hausse un programme de construction de moyens de production ;

° Même en l'absence d'inflexion du programme de construction, le risque maximum est essentiellement financier et est constitué d'investissements échoués qui seraient limités à une faible partie des moyens de production et réseaux associés, qui eux-mêmes ne représentent qu'une part minime de l'investissement national ;

° De plus, ce risque est quasi-inexistant pour un investissement en moyens nucléaires compte tenu des besoins en moyens pilotables qui seront très importants à l'avenir au niveau européen dans le contexte annoncé du « tout éolien + photovoltaïque » qui va considérablement réduire les capacités pilotables ;

° Enfin, compte tenu de ses faibles coûts proportionnels de production, le nucléaire est, dans « l'ordre de mérite », le moyen systématiquement appelé juste après les sources d'électricité fatales : hydraulique au fil de l'eau ; éolien et photovoltaïque ; ceci bien avant les autres moyens : utilisant des sources fossiles, avec ou sans captage et séquestration du carbone ; moyens fonctionnant à l'hydrogène ou au biogaz ; etc. L'électricité nucléaire s'exporte donc facilement.

C'est en l'occurrence ce qui s'est historiquement passé avec le parc nucléaire actuel, construit en un temps record pour desserrer massivement et au plus vite la dépendance au pétrole et qui pendant un certain temps s'est trouvé surdimensionné par rapport aux besoins nationaux. Mais il a très vite trouvé son utilité dans les exportations vers les pays voisins, permettant à la France de devenir le premier exportateur d'électricité en Europe pour le plus grand bénéfice de la balance commerciale du pays.

9 – À quels coûts ?

C'est évidemment une question fondamentale dans le contexte d'une électricité, qui est déjà un bien de première nécessité, appelée à devenir le vecteur énergétique ultradominant dans les décennies à venir.

On se limitera ici aux coûts des quatre sources non émettrices de CO₂ ayant les capacités de production actuelles ou futures les plus importantes, aptes à répondre à l'échelle des besoins d'un pays comme la France, les autres moyens n'étant pas à éliminer mais ne pouvant jouer qu'un rôle marginal en l'état actuel des connaissances. Il s'agit donc :

° De l'hydraulique, essentiellement historique,

° Du nucléaire : historique prolongé d'au moins 10 ans pour tous les réacteurs et de 20 ans pour la plupart d'entre eux, ainsi que du nouveau nucléaire (EPR2 optimisé de série),

° Du photovoltaïque : en toitures (résidentielles, commerciales) et au sol (grandes unités industrielles),

° De l'éolien : terrestre et en mer (posé et flottant).

Les sources documentaires de ces coûts sont les suivantes :

* Les coûts unitaires de production du nucléaire, du photovoltaïque et de l'éolien terrestre et « posé » en mer, sont les coûts projetés en 2025 issus du dernier rapport AIE-AEN publié en décembre 2020 (voir [annexe 1 ; figure 4](#)). Ils sont exprimés en \$/MWh dans ce document). Ces coûts ont été convertis en euros et arrondis dans le tableau 7 ci-après sur la base d'un taux de conversion pris égal à 1 € = 1,1 \$.

De plus, ce rapport AIE-AEN indique les coûts pour différents taux d'actualisation de financement (taux d'intérêts moyens de financement). C'est une information majeure dans la mesure où tous les moyens évoqués sont très capitalistiques, le nucléaire davantage que les autres du fait de sa très grande durée d'exploitation (60 ans au moins et probablement plus de 80) ce qui entraîne des durées d'amortissement d'au moins 50 à 60 ans.

Les moyens éoliens et photovoltaïques, d'une durée de vie estimée à 25 à 30 ans, sont beaucoup moins sujets à ce facteur du fait de leur durée de vie et donc d'amortissement beaucoup plus courtes. Mais ils doivent en contrepartie être renouvelés en quasi-totalité à ces mêmes échéances.

Enfin, concernant les coûts unitaires de l'hydraulique historique et de l'éolien flottant, ils ont été estimés sur d'autres bases, les données sur les coûts de l'éolien flottant étant actuellement très rares par manque de références industrielles. Il s'agit donc de valeurs déduites des toutes premières installations.

Cependant, comme déjà évoqué plus haut au § 6, ces coûts « aux bornes des machines » pour l'éolien et le photovoltaïque ne sont pas représentatifs du coût complet de l'électricité produite par le « système électrique » qui doit offrir un service permanent et pas seulement intermittent.

Il faut donc leur ajouter les surcoûts :

*** De compensation de leur intermittence-variabilité,**

*** Des réseaux, car les moyens éoliens et photovoltaïques ayant des puissances unitaires beaucoup plus faibles que les moyens nucléaires, ils doivent être beaucoup plus nombreux et beaucoup plus répartis sur l'ensemble du territoire pour apporter la même production. Ces conditions entraînent une nécessaire et profonde restructuration des réseaux de transport et de distribution, avec un très grand nombre de liaisons nouvelles à créer et de liaisons à renforcer.**

* Les surcoûts de compensation de l'intermittence et de réseaux retenus ici sont quant à eux issus d'une étude réalisée par la société Energy Pool Développement SAS sur la base des conditions de 2019 (voir [annexe 2 ; figure 5](#)).

Ils ont été présentés lors d'une conférence organisée par l'Association Savoie Nova, donnée par Olivier BAUD, Président fondateur d'Energy Pool le jeudi 22 octobre 2020 à Chambéry, intitulée :

« Le développement des énergies renouvelables dans la production d'électricité - Enjeux et réalités »

Les visuels commentés en 1ère et 2ème parties de la conférence sont accessibles sur :

[<https://savoienova.eu/actualites/>](https://savoienova.eu/actualites/)

NB : il est important de noter que les raccordements des éoliennes terrestres sont systématiquement réalisés en câbles enterrés, ce qui augmente fortement leurs coûts.

Quant au coût moyen de raccordement des éoliennes en mer, il n'est pas issu de la conférence ci-dessus et a été approximativement estimé à partir de données issues de RTE.

* En synthèse, la somme des « coûts unitaires aux bornes machines » et des « surcoûts de compensation de l'intermittence et de réseaux » donne les « coûts complets au niveau du système électrique » qui en résultent. Ils sont résumés dans le [tableau 7](#) ci-après :

NB : l'analyse des coûts ci-dessus est fondée sur l'addition des coûts de production « aux bornes des machines » et des surcoûts induits par les sources renouvelables intermittentes. C'est une approche que l'on peut qualifier d'« analytique ».

Une autre méthodologie est possible : l'approche « globale » qui consiste à tenir compte de l'ensemble des coûts annuels du système électrique complet, toutes sources mises en œuvre confondues, fonction du mix retenu. Cette approche en principe plus précise n'est cependant accessible qu'avec des logiciels adaptés.

Coûts en €/MWh	Coût aux bornes des machines	Surcoûts de compensation de l'intermittence	Surcoûts réseaux	Coût complet système
Moyens de production				
Hydraulique historique	< 45	0	0	< 45
Nucléaire historique prolongé de 10 ans	30 32 34	0	0	30 32 34
Nucléaire historique prolongé de 20 ans	26 28 30	0	0	26 28 30
Nouveau nucléaire	41 65 88	0	0	41 65 88
Photovoltaïque toiture (résidentiel)	84 112 137	22	16	122 150 175
Photovoltaïque toiture (commercial)	53 67 79	22	16	91 105 117
Photovoltaïque au sol (grandes centrales)	22 31 38	22	16	60 69 76
Eolien terrestre	40 51 61	22	16	78 89 99
Eolien en mer posé	62 82 99	22	20	104 124 141
Eolien en mer flottant	Non précisé	> 220	22	> 270

Tableau 7 : structuration et estimation des coûts des principaux moyens de production

Ces résultats appellent plusieurs remarques :

° D'abord, les seules comparaisons qui ont un sens économique sont celles des coûts complets système, qui reflètent des services rendus à peu près équivalents (dernière colonne du tableau),

° Les coûts complets les plus bas toutes catégories sont ceux du nucléaire historique qui apparait comme le moyen de très loin le plus compétitif,

° Sans surprise, le coût complet du nouveau nucléaire (EPR2 optimisé de série) dépend très fortement du taux d'actualisation retenu pour financer sa construction du fait de sa longue durée de construction et surtout d'exploitation : le coût du MWh passe ainsi de 41 à 88 € (soit plus d'un doublement) lorsque le taux d'actualisation passe de 3 à 10 %. Ceci indique très clairement que le taux de financement du nouveau nucléaire est un facteur critique de sa future compétitivité. Il reste néanmoins le plus compétitif des nouveaux moyens de production en coût complet système, à condition qu'il soit financé à un taux d'actualisation qui ne dépasse pas 7 %.

NB : le nucléaire n'induit évidemment pas de coûts de compensation, il est au contraire LE moyen majeur de compensation de l'intermittence grâce à sa grande manœuvrabilité. Il n'induit pas non plus de surcoûts réseau significatifs, les sites sur lesquels il est installé étant raccordés depuis longtemps. C'est un avantage comparatif très important au vu des coûts très élevés d'adaptation des réseaux nécessités par les sources renouvelables.

° Malgré les baisses de prix de l'éolien et plus encore du photovoltaïque « aux bornes des machines » depuis les années 2000, qui marquent le début de leur développement, les coûts complets système de ces sources restent nettement plus élevés. Dans l'ordre des coûts croissants, le moyen le moins coûteux est le photovoltaïque au sol en grandes centrales, seul mode de photovoltaïque qui soit réellement compétitif. Vient ensuite l'éolien terrestre qui reste moins cher que l'éolien en mer, dont les coûts intrinsèques et les surcoûts réseaux sont plus élevés.

NB : les coûts actuels « aux bornes des machines » de l'éolien terrestre sont très sensiblement supérieurs aux coûts anticipés par l'AIE-AEN en 2025. Ils se situent en effet encore au-dessus des 61 €/MWh du

tableau 7 pour les appels d'offres et surtout, la dérogation relative aux parcs éoliens de moins de 7 mâts et 18 MW, toujours en vigueur et semble-t-il très largement utilisée par les promoteurs des parcs éoliens, fixe toujours un tarif d'achat garanti nettement plus élevé qui se situe entre 72 et 74 €/MWh, indépendamment des prix de marché.

Il faut en outre rappeler que l'éolien et le photovoltaïque continuent à être largement subventionnés et n'existeraient pas sans ces subventions. Ce qui pouvait se comprendre au début de leur développement, pour de nouvelles sources de production n'ayant pas encore atteint leur maturité technologique, est devenu incompréhensible alors que les promoteurs de ces énergies clament qu'elles sont compétitives. Il serait plus que temps de les prendre au mot et d'arrêter de les subventionner, ce qui a déjà coûté très cher aux consommateurs d'électricité, puis aux contribuables auxquels cette charge a été transférée depuis 2017. À cette date, les subventions payées aux producteurs d'électricité éolienne et photovoltaïque et restant à payer sur les contrats déjà engagés (compte tenu de leurs durées allant de 15 à 20 ans selon les cas) représentaient un engagement global de plus de 120 Mds€ selon les estimations très officielles de la CRE (Commission de régulation de l'énergie). Somme considérable qui a continué à croître, avec les nouveaux contrats signés depuis 2017 et continuera à le faire tant que les subventions continueront. Jusqu'à quand ? Ces sommes colossales interrogent à deux égards :

- Elles permettent aux promoteurs de ces énergies d'investir sans risques marché (priorité absolue d'accès au réseau et prix garantis sur 15 ou 20 ans) et d'encaisser des bénéfices très confortables : il suffit de voir le nombre de candidats venant du monde entier prêts à investir, ces investissements étant sans équivalent dans le monde de l'énergie et de l'industrie. Tout cela étant subventionné par de l'argent public,

- Elles auraient été infiniment plus efficaces pour réduire les émissions de CO₂ si elles avaient été consacrées à l'amélioration de l'habitat (isolation et remplacement des chauffages à base d'énergies fossiles par des moyens décarbonés).

Il s'agit là d'une politique exorbitante du droit commun de la concurrence promue par la Commission européenne, qui a par exemple coûté jusqu'à présent environ 500 Mds€ aux consommateurs allemands, l'Allemagne ayant près de 5 fois plus d'électricité intermittente que la France, ce qui lui a donné le privilège d'avoir l'électricité domestique la plus chère d'Europe, à égalité avec le Danemark, lui aussi couvert d'éoliennes. Pourtant, faire une pause et un retour d'expérience objectif ne semble toujours pas être à l'ordre du jour. Jusqu'à quand ?

10 – La France doit arrêter de suivre la folle politique de la Commission européenne du « tout éolien + photovoltaïque » et défendre à tout prix son option nucléaire à long terme

- Pourquoi la politique du « tout éolien + photovoltaïque » mène l'Europe dans le mur

Cette politique promue par la Commission européenne est fortement instrumentalisée par un certain nombre de pays ayant décidé de sortir eux-mêmes du nucléaire et qui veulent imposer leur choix aux autres pays européens. Elle mène pourtant le continent à l'échec comme il ressort de l'analyse ci-dessus, faite pour la France, mais dont les conclusions sont généralisables. Ceci pour deux raisons dont chacune est rédhibitoire :

* La première est que personne n'est à ce jour capable de garantir qu'un système « 100 % renouvelable » (qui implique des productions éoliennes et photovoltaïques ultra-majoritaires) est techniquement capable de fonctionner avec un niveau de sécurité équivalent à celui, très élevé, du système actuel. C'est un feu rouge absolu pour une infrastructure classée à juste titre comme infrastructure d'importance vitale pour le pays qui ne peut par conséquent évoluer que sur la base de technologies parfaitement éprouvées et sûres. Or, c'est dès maintenant que les orientations stratégiques pour 2050 et décisions associées doivent être arrêtées eu égard aux constantes de temps d'adaptation d'une infrastructure aussi complexe,

* La deuxième est qu'un système « 100 % renouvelable » est quantitativement limité en production d'électricité par les possibilités réelles et pas seulement théoriques d'installer suffisamment d'éoliennes à terre et/ou en mer et de panneaux photovoltaïques et par les oppositions sociétales très fortes suscitées par ces installations.

Cela tient en particulier à trois paramètres :

° La très faible concentration spatiale des énergies primaires du vent et du soleil, qui requièrent de très grandes surfaces de captation. C'est une donnée physique fondamentale indépassable, qui varie selon les lieux (plus ou moins bien ventés) et la latitude (plus ou moins d'ensoleillement),

° Les surfaces réellement disponibles. Elles sont le plus souvent bien inférieures aux surfaces physiques apparemment disponibles compte tenu des autres usages de l'espace et de nombreuses contraintes : restrictions environnementales, agricoles, exclusions militaires, oppositions sociétales, etc.

° Le niveau de la demande en énergie, qui dépend de plusieurs paramètres, notamment de la population du pays et de son type de développement.

La densité de population est l'un des indicateurs pertinents. Par exemple, la situation de la Norvège, pays très étendu avec peu d'habitants (densité de ≈ 14 habitants/km²) et qui dispose de ressources hydrauliques produisant 96 % de son électricité et de forêts étendues, n'a rien à voir avec celle des Pays-Bas, pays beaucoup plus peuplé (densité > 500 habitants/km²), dépourvu d'hydraulique et de forêts importantes. Le recours principal aux énergies renouvelables de ce pays sera vraisemblablement l'éolien en mer, compte tenu de la forte occupation de son territoire.

La France occupe une position intermédiaire (densité de ≈ 120 habitants/km²), dispose d'hydraulique et de forêts à un bon niveau, mais a une population importante. Les estimations explicitées au § 7 (quasi doublement de la production d'électricité qu'il faut envisager selon les études les plus réalistes) et au § 8 (mix électriques nécessaires pour y répondre) montrent qu'un mix « tout renouvelable » est incapable de satisfaire les besoins du pays en 2050, en dépit des meilleurs gains d'efficacité énergétique et des efforts de sobriété que l'on peut imaginer. La conséquence est donc vitale au sens propre du terme :

Tout miser sur le « tout éolien + photovoltaïque » en rejetant le nucléaire serait se condamner à une très faible disponibilité d'électricité en 2050, c'est-à-dire à une pénurie sévère d'énergie, avec des conséquences économiques, sociales et sociétales qui conduiraient à un appauvrissement généralisé ne permettant pas de conserver une société développée. Il fait peu de doute qu'une telle perspective serait inacceptable pour l'immense majorité des citoyens.

Qu'en sera-t-il pour d'autres pays ? Les solutions doivent tenir compte des particularités de chacun, mais ceux qui ont peu de ressources hydrauliques et/ou de biomasse et refusent le nucléaire devront trouver d'autres sources d'énergie. Lesquelles ?

L'Allemagne, qui a décidé de sortir définitivement du nucléaire fin 2022 et doit réduire son utilisation de charbon/lignite pour diminuer ses émissions de CO₂, et la Belgique qui veut emprunter le même chemin dès 2025 pour son nucléaire, misent sur le gaz fossile, présenté comme une solution « de transition ». Mais transition vers quoi ? Sans miracle du côté des énergies renouvelables qui augmenteraient par magie leur production, il s'agira en réalité d'une solution pérenne qui ne pourra alors se justifier d'un point de vue climatique qu'en lui associant le captage et la séquestration du CO₂ émis. Ce ne semble pas être prévu pour l'instant. De plus, l'usage du gaz fossile s'accompagne de fuites (qui se produisent surtout lors de l'extraction et du transport) dont le principal composant, le méthane, a un pouvoir réchauffant très élevé (environ 25 fois plus que le CO₂ à 100 ans). C'est donc loin d'être un combustible sans impact sur le climat, même si l'on capte et séquestre le CO₂ lors de son utilisation.

Ce qui est certain, c'est que l'Allemagne a stratégiquement décidé de sécuriser à long terme son alimentation en gaz avec la Russie, via NordStream 1 et bientôt NordStream 2, et qu'une partie de ce gaz sera revendue à ses voisins européens... Elle envisage également d'importer des quantités massives d'hydrogène (jusqu'à 2/3 de ses besoins, semble-t-il ?). Cet hydrogène serait produit à partir d'énergie solaire dans les pays très ensoleillés, notamment ceux du nord de l'Afrique et importé via un réseau transméditerranéen et transeuropéen de gazoducs. Est-ce réaliste ? L'avenir tranchera.

En tout état de cause, ces deux solutions basées sur des importations massives de gaz, carbonés ou pas, présentent l'inconvénient majeur d'une dangereuse dépendance énergétique géostratégique, face aux risques de déstabilisation politique à l'horizon 2050 de certains pays fournisseurs de ces gaz : il pourrait leur être facile de fermer les vannes...

- La France a tous les moyens d'échapper à ce destin à condition de le vouloir

Elle dispose en effet d'un atout maître : son parc nucléaire développé massivement à partir des années 1970 pour desserrer la dépendance au pétrole et augmenter son indépendance énergétique. À cet objectif toujours d'actualité est venu s'ajouter l'impératif climatique, donnant une légitimité supplémentaire essentielle à l'option nucléaire. D'énormes émissions de CO₂ ont déjà été évitées depuis 40 ans et, comme déjà souligné au § 5, le nucléaire associé à l'hydraulique a permis à la France de devenir le « grand pays électrique » qui émet de loin le moins de CO₂ par kWh produit au monde. Ceci sans compter sur d'autres avantages également très importants : une exceptionnelle indépendance géostratégique (le pays dispose sur son sol de 2 à 3 ans de stocks d'uranium, qui pourraient en cas de nécessité être étendus à 7 à 8 ans par retraitement des stocks d'uranium appauvri) ; des retombées industrielles très importantes (3ème secteur industriel du pays, pourvoyeur d'emplois hautement qualifiés) ; et in fine une électricité ultra-compétitive en termes de prix.

Cet acquis majeur ouvre la possibilité de pérenniser durablement l'option nucléaire, les besoins en énergie de 2050 conduisant aux conclusions résumées suivantes :

Pour satisfaire en 2050 la double exigence de protection du climat et d'une alimentation en électricité suffisante du pays, le nucléaire est la seule solution connue, éprouvée, efficace et économiquement soutenable actuellement disponible. Sa contribution devrait alors être la plus élevée possible, au-delà d'un talon de 50 % (impliquant 68 GW installés, soit 5 GW de plus que dans le parc historique) qui garantit un fonctionnement inchangé du système électrique. Mais alors la part des productions intermittentes nécessaires atteindrait 41 %, impliquant environ 200 GW d'éoliennes, à terre et en mer, et de photovoltaïque, ce qui soulèverait des difficultés importantes de faisabilité. Augmenter la part du nucléaire à 70 % (impliquant 95 GW installés, soit 32 GW de plus que dans le parc historique) diviserait par 2 les productions intermittentes nécessaires, n'impliquant plus qu'environ 100 GW d'éoliennes, à terre et en mer, et de photovoltaïque.

L'atteinte de ces capacités nucléaires en 2050, supérieures à la capacité actuelle, suppose cependant à la fois :

* Une prolongation maximale des réacteurs actuels, envisageable au regard du retour d'expérience des réacteurs américains de même technologie, une grande majorité d'entre eux ayant été prolongés jusqu'à 60 ans, certains l'étant même jusqu'à 80 ans et des durées de 100 ans étant mises à l'étude. Envisager des prolongations des réacteurs français jusqu'à au moins 60 ans pour tous et 70 voire 80 ans pour la plupart, sous réserve bien sûr de validation par l'ASN, ne relève donc en rien de la fiction.

Même si les décisions définitives ne pourront être prises qu'ultérieurement compte tenu du système réglementaire français (l'ASN se prononce tous les 10 ans, pour 10 nouvelles années d'exploitation pour chaque réacteur) il est essentiel que les études et la R&D éventuellement associée permettant de justifier les prolongations de durée de vie des réacteurs soient engagées sans tarder afin d'éclairer l'avenir à long terme du parc nucléaire actuel. Lors de son audition par la Commission des affaires économiques du Sénat le 7 avril 2021, le Président de l'ASN a d'ailleurs très clairement souhaité que cette démarche soit anticipée dès maintenant, concernant la prolongation à 60 ans des réacteurs 900 MW.

* Le lancement devenu urgent de nouveaux réacteurs, indispensable pour permettre à la filière industrielle nucléaire de remonter rapidement en puissance et compétences humaines pour être à même de faire face au rythme de construction qui sera nécessaire. Le nombre de nouveaux réacteurs nécessaires d'ici 2050 et leur rythme de construction restent à définir précisément, sachant qu'il s'agit d'un programme très ambitieux qui implique une politique industrielle nationale comparable à celle qui a permis la construction du parc nucléaire actuel.

Dans cette perspective, le rythme d'engagement et de construction d'un premier programme de trois paires de réacteurs EPR2 optimisés, dont l'étude a été demandée à EDF par le gouvernement n'est, selon les informations disponibles, probablement pas suffisant et devrait être réinterrogé et accéléré pour mieux répondre aux besoins.

De plus, l'engagement du pays dans un tel programme suppose des conditions politiques et industrielles claires et constantes dans la longue durée.

Ces conditions commencent par une volonté politique affirmée, qui devra ensuite être constante dans la durée, concrétisée par le lancement de programmes de plusieurs réacteurs donnant une visibilité de long terme à la filière industrielle nucléaire au travers d'engagements contractuels fermes, comme cela a été fait pour la construction des réacteurs actuels. Cela permet en outre de faire baisser les coûts de façon très importante par effet de série et de capitaliser sur l'expérience des hommes et des entreprises qui sont des facteurs majeurs de qualité et de productivité et par conséquent de tenue des délais.

Il appartiendra ensuite aux divers acteurs concernés (institutionnels, industriels, financeurs, etc.) de mettre en œuvre cette politique nationale qui impliquera nécessairement un effort de grande ampleur pour le pays. C'est le prix à payer pour espérer disposer de suffisamment d'énergie en 2050.

Notons pour terminer que contrairement à certaines affirmations ou illusions, l'option nucléaire n'est pas une solution transitoire qui aurait vocation à s'effacer avec la croissance sans limite des seules énergies renouvelables. Ceci en raison de l'incapacité structurelle de ces dernières à alimenter une consommation d'électricité un tant soit peu importante. L'option nucléaire constitue au contraire une solution durable de long terme.

- Vraies informations et faux dangers : il est temps d'informer honnêtement les citoyens

Face à des enjeux aussi vitaux pour l'avenir que le dérèglement climatique et l'alimentation en énergie du pays, il est temps d'informer clairement et honnêtement les citoyens, soumis depuis trop longtemps à un dénigrement idéologique du nucléaire, avec des slogans simplistes et infantiles du type « *le vent et le soleil, c'est bien ; le nucléaire, c'est mal* ». Malheureusement, une grande partie de la presse a servilement relayé cette idéologie, suivie par une partie des milieux politiques. Plus grave encore, le consensus sur l'option nucléaire qui rassemblait les partis de gouvernement depuis des décennies a été mis à mal depuis 2012 au plus haut niveau de l'État, au travers de déclarations contradictoires et par la fermeture de la centrale de Fessenheim pour raisons purement politiciennes (pêche aux voix). Tout cela a eu des effets délétères sur l'opinion publique, qui est depuis trompée sur les réalités et enjeux de cette option pour l'avenir du pays, donc sur ses possibilités de choix électoraux éclairés, les 2/3 des français croyant par exemple que le nucléaire émet du CO₂ !!! Cela dissuade en outre les jeunes générations de s'engager dans cette filière industrielle stratégique qui a pourtant un avenir à long terme.

Deux sujets au moins parmi d'autres doivent être mis sur la table :

- * L'impact majeur qu'aurait l'abandon du nucléaire sur le niveau de vie en 2050

La réalité des chiffres impose de faire tomber les illusions et croyances magiques sur les énergies renouvelables et d'informer honnêtement les citoyens que sans nucléaire, ils devront se préparer à des restrictions énergétiques très sévères qui changeront profondément leur mode de vie actuel. Ce qui signifie que le choix de pérenniser le nucléaire n'est pas un simple choix technologique, mais engage un choix de société sur lequel les citoyens ont vocation à se prononcer.

NB : le seul « plan B » accessible en cas de double refus des restrictions d'énergie et du nucléaire serait celui des pays qui refusent actuellement le nucléaire : un retour massif au gaz fossile, avec CCS (captage et séquestration du carbone) mais cette technologie comporte de grandes incertitudes de faisabilité technique et coûterait beaucoup plus cher que le nucléaire, ou sans CCS, qui conduirait à une régression incompréhensible par rapport à la situation actuelle, inadmissible pour le climat. Dans les deux cas, il faudrait importer massivement du gaz, ce qui mettrait la France dans une grande dépendance énergétique extérieure et enfoncerait massivement le déficit de sa balance extérieure, déjà très important. Le pays n'a probablement pas les moyens d'envisager un tel « plan B », sauf à s'appauvrir massivement.

- * La question des déchets : une appréciation dramatiquement erronée des dangers comparés du nucléaire et du dérèglement climatique

La question des déchets est depuis longtemps utilisée par les antinucléaires comme un épouvantail facile. Ils occultent évidemment la réalité des moyens extrêmement rigoureux mis en œuvre pour les gérer. Mais l'opinion publique, qui connaît très peu le sujet et s'inquiète donc en toute bonne foi, est sensible à cette question comme le montrent les sondages.

On a aussi entendu une ministre bien-pensante de la République déclarer, probablement désireuse de se présenter en « grande conscience autoproclamée » : « *On ne peut pas continuer à laisser des déchets nucléaires aux générations futures* ».

Mais le comble est atteint par la Commission européenne qui, poussée par les pays qui veulent sortir du nucléaire, utilise cette même fausse question des déchets nucléaires pour refuser à cette énergie le bénéfice de son inclusion dans la « Taxonomie verte » qui procure aux énergies qui en font partie des financements avantageux.

Ces positions ne résistent cependant pas à une analyse objective et se trompent en outre de cible :

° Elles méconnaissent d'abord le principe de réalité : des déchets nucléaires sont produits en France (et ailleurs en Europe) depuis plus d'un demi-siècle, on ne peut pas faire comme si le présent n'existait pas. Et ils ne sont pas seulement produits par les centrales nucléaires qui ne sont en France à l'origine que de 60 % des déchets les plus actifs ou à vie très longue. La recherche, l'industrie, le militaire, la médecine nucléaire produisent le reste. Il existe par conséquent un stock qu'il faut en tout état de cause gérer, et arrêter les centrales nucléaires demain ne résoudrait pas la question. Il faudrait aussi arrêter toutes les autres activités nucléaires, y compris celles qui produisent des radioéléments pour la médecine nucléaire. Recul de plus d'un demi-siècle.

° D'autre part, contrairement à ce que veut faire croire la doxa « verte », des solutions fondées sur la science, extrêmement rigoureuses et sûres, existent pour stocker tous les types de déchets, notamment les plus dangereux et/ou durables. Pour ces derniers, c'est le stockage géologique en couche profonde, dans des structures stables depuis des centaines de millions d'années qui est reconnu à l'international comme la solution de référence pour gérer sur le long terme les déchets nucléaires de haute et de moyenne activité et à vie longue et est déjà adopté dans plusieurs pays, dont le sérieux ne fait aucun doute. Comme le rappelle Dominique Finon, directeur de recherche au CNRS en économie de l'énergie :

« Sur la question des déchets nucléaires et de leur stockage géologique, tout observateur avisé ne peut que constater que, dans des pays démocratiques (Suède, Finlande, Canada), des solutions de stockage définitif ont été reconnues comme sûres et ont été adoptées après un débat apaisé ».

On ajoutera aux trois pays cités, deux autres pays parfaitement responsables et démocratiques, la Suisse en phase finale de choix d'un site et l'Allemagne qui s'oriente vers la même solution.

En France, le projet CIGEO répond à ces critères : il a déjà fait l'objet d'études géologiques approfondies sur une très longue période, puis d'études de sûreté par l'IRSN et d'autres organismes compétents qui permettront sa validation définitive par l'ASN, qui a déjà validé ses grandes lignes. Sa sûreté ne fera donc aucun doute.

° Ceux qui veulent arrêter le nucléaire au motif qu'il produit des déchets se trompent en outre de cible en ignorant ou faisant semblant d'ignorer que le nucléaire a été identifié par le GIEC parmi les nouvelles technologies ayant un « *potentiel de réduction massive des émissions à long-terme* ». Ceci signifie en clair que s'en priver augmenterait le risque d'aggraver le réchauffement climatique. La vraie question est donc de choisir entre :

- La certitude d'aggraver les conséquences dramatiques du réchauffement climatique en se privant de l'énergie la moins émettrice de CO₂ : populations chassées de leurs territoires par la montée des eaux, ailleurs par l'aggravation des sécheresses et la famine, entraînant des guerres pour l'espace et pour l'eau, migrations massives vers les pays les moins affectés qui déstabiliseront profondément leurs sociétés humaines, etc. causant des morts et drames humains en grand nombre. Ceci bien avant la fin du siècle,

- Un risque fantasmé lié aux déchets nucléaires enfouis en couches profondes qui, selon les agitateurs professionnels de peurs irrationnelles, pourraient avoir été « oubliés » puis être « redécouverts » à 500 m sous terre par quelques lointains descendants imprudents, supposés avoir perdu la mémoire dans 1 000, 10 000 ou 100 000 ans... Cette préoccupation est d'ailleurs prise en compte dans la conception de ce type de stockage, afin de répondre à la question : « Comment assurer la préservation des documents, des connaissances et de la mémoire des déchets radioactifs génération après génération sur plusieurs siècles et même millénaires ? ». Il n'existe aucun moyen unique optimal à toutes les échelles de temps pour répondre à cette question. Divers canaux diversifiés de communication devront donc être étudiés et mis en œuvre. L'ANDRA a de son côté initié un projet dédié à ce sujet, dénommé « Mémoire ». Des solutions à base d'idéogrammes ont notamment été proposées.

Quoi qu'il en soit, refuser, au nom d'un principe de précaution obsessionnel de nantis, ce soi-disant risque qui ne tuera jamais personne relève en réalité de l'ignorance, de l'inconscience irresponsable ou de la manipulation idéologique, non de la protection réelle des générations futures. Ces dernières ont malheureusement infiniment plus à craindre du réchauffement climatique que de déchets nucléaires rigoureusement gérés, y compris sous nos latitudes (on vient d'en avoir une illustration avec les inondations catastrophiques de juillet 2021 qui ont fait 200 morts en Allemagne et en Belgique).

En résumé :

Il est temps de rétablir les réalités dans ce domaine, qui ne convaincront certainement pas les anti-nucléaires et les idéologues, mais devraient rassurer les honnêtes citoyens qui souhaitent comprendre et qui ont été manipulés pendant des décennies par les faiseurs de peurs irrationnelles.

- Pour conclure

Il est plus que temps de quitter les illusions, les idéologies et les pensées magiques anti-scientifiques pour retrouver la rationalité et la réalité qui seules permettent de prendre les bonnes orientations et décisions, face à un avenir climatique et énergétique totalement nouveau qui constitue un défi d'une complexité extrême, car il devra tenter de concilier la lutte contre le dérèglement climatique et un futur énergétique acceptable pour le pays.

On terminera par deux déclarations :

* Celle, ancienne, de Bernard Bigot, ancien Haut-commissaire à l'Énergie atomique ; ancien Administrateur Général du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives ; actuellement directeur général de l'organisation internationale ITER qui construit le prototype de fusion nucléaire éponyme à Cadarache :

« On ne fait pas du nucléaire par plaisir mais par nécessité »

Cette nécessité n'a jamais été aussi grande, le nucléaire étant l'une des rares « *chaloupes de sauvetage* » (selon les mots de Jean-Marc Jancovici) disponibles, en fait la plus efficace, permettant de conserver suffisamment d'énergie pour ne pas couler dans un monde de pénuries énergétiques renouvelables.

* Celle du Directeur exécutif de l'AIE, lors de son interview par les Echos en janvier 2021 :

« Fermer les centrales nucléaires françaises serait une erreur. L'énergie nucléaire est un atout national pour la France. Ces dernières décennies, son développement a été une des composantes de la croissance économique française et sur le plan technique, elle a prouvé qu'elle fonctionne à grande échelle [...] L'objectif d'atteindre zéro émissions à 2050 est un défi herculéen. Nous n'avons pas le luxe de nous priver de l'une ou l'autre des énergies propres. Pour la France, le nucléaire et les énergies renouvelables sont complémentaires ».

Annexe 1 : Coûts actualisés des moyens de production

Référence : article d'Énergiepress sur un nouveau rapport AIE-AEN disponible sur :
https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_51110/projected-costs-of-generating-electricity-2020-edition?id=pl_51110&preview=true

Ci-dessous un graphe issu de ce rapport pour la France - Coûts LCOE anticipés en 2025 :

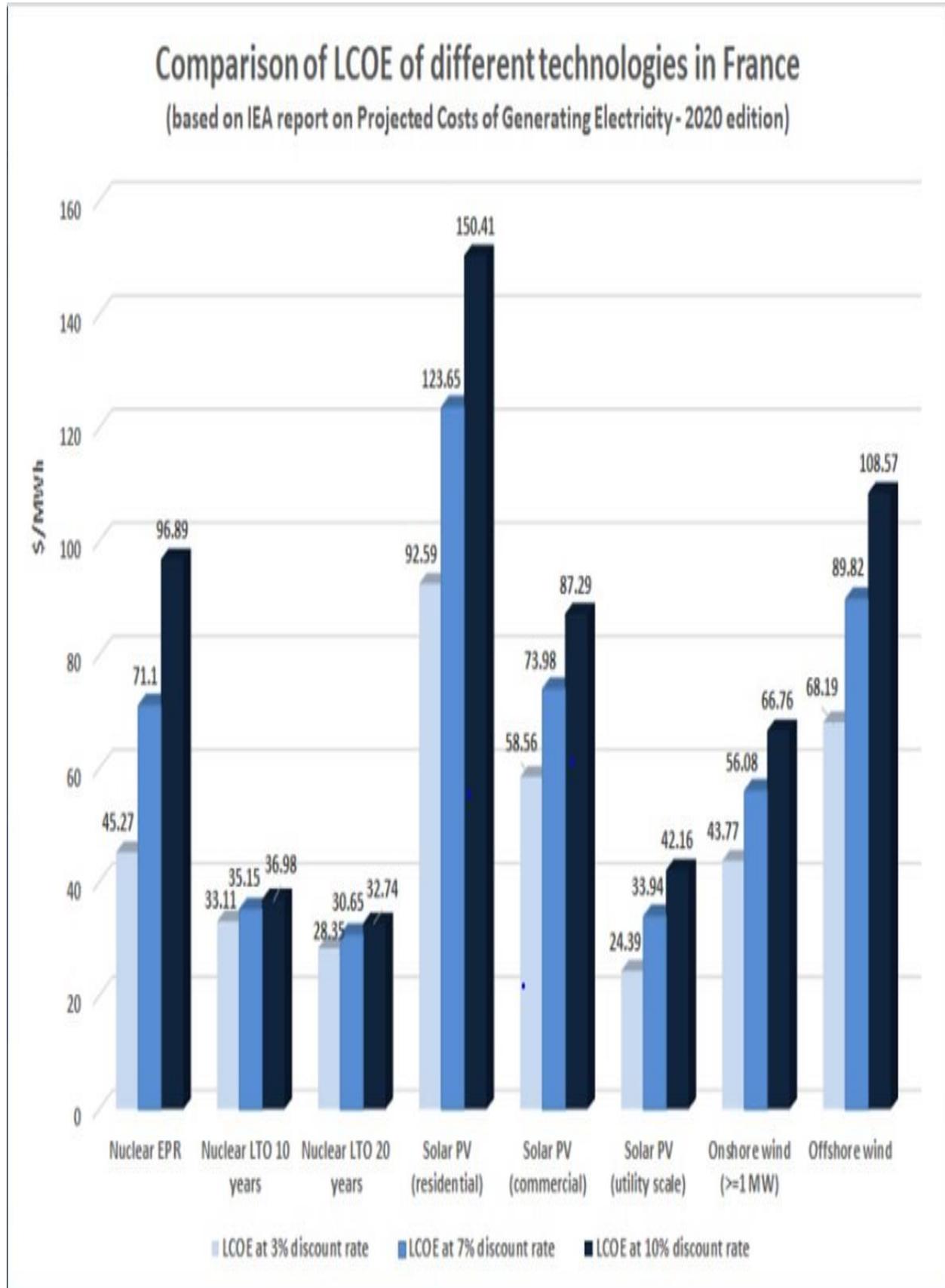


Figure 4 : « Des technologies de production à faibles émissions de CO₂ de plus en plus compétitives »
(Source – Projected Costs of Generating Electricity Edition 2020 – Décembre 2020 – IEA/NEA)

Extraits de l'article d'ENERPRESSE citant le rapport AIE-AEN - LCOE PAR TECHNOLOGIES :

« Le rapport quinquennal de l'AIE et de l'AEN sur les coûts actualisés de la production d'électricité montre le positionnement en première place à court terme du nucléaire. L'éolien terrestre et le solaire tirent également leur épingle du jeu.

Les coûts actualisés de la production d'électricité (LCOE) des technologies de production à faibles émissions de carbone « sont en baisse et sont de plus en plus inférieurs aux coûts de la production de combustibles fossiles conventionnels ». C'est l'un des points clés du rapport Projected Costs of Generating Electricity publié par l'Agence internationale de l'énergie (AIE) et l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) mercredi 9 décembre. Cette étude donne des projections du LCOE en 2025 en se basant sur un coût de 30 dollars la tonne de CO₂. Le rapport qui fournit des données pour 243 sites de production d'électricité de 24 pays relève que les coûts attendus pour de nouvelles centrales nucléaires sont plus faibles dans l'édition 2020 qu'en 2015.

Des coûts inférieurs sont anticipés en raison de l'apprentissage de construction de projets pilotes dans de nombreux pays. Toutefois des différences régionales restent très importantes.

*Le nucléaire reste donc la technologie à faible émission de carbone avec les coûts attendus les plus bas en 2025 », indique le rapport. Seuls les grands réservoirs hydroélectriques sous certaines conditions peuvent atteindre des coûts comparables. Les centrales nucléaires devraient battre les centrales à charbon. Concernant les centrales à gaz, cela est fortement dépendant du prix du combustible. **Le rapport constate également que la prolongation de l'exploitation des centrales nucléaires existantes (LTO) est « la source la plus rentable d'électricité à faible émission de carbone.***

L'éolien terrestre devrait avoir, en moyenne, « les coûts actualisés les plus bas de la production d'électricité en 2025 ». Certes, les coûts varient fortement d'un pays à l'autre, mais cette projection reste vraie pour une majorité de pays, souligne le rapport. Concernant le photovoltaïque, s'il est déployé à grande échelle et dans des conditions climatiques favorables, il peut également être « très compétitif en termes de coûts ».

L'éolien offshore connaît, lui, une baisse de coût importante par rapport à l'édition précédente de ce rapport. « Alors qu'il y a cinq ans, le LCOE médian dépassait encore 150 \$/MWh, il est désormais nettement inférieur à 100 €/MWh et donc dans une fourchette compétitive..

Les analyses des deux technologies hydrauliques (fil de l'eau et réservoir) « peuvent fournir des alternatives compétitives là où des sites appropriés existent, mais les coûts restent très spécifiques au site.

Sur la base des données fournies, les États-Unis et l'Australie, les centrales à charbon et au gaz avec captage, utilisation et stockage du carbone (CCUS) restent, avec un prix 30 \$/tCO₂, non compétitives par rapport aux centrales à combustibles fossiles sans ce type de système. Il faut un prix du CO₂ « considérablement plus élevé » pour qu'elles le deviennent.

D'un point de vue économique et durable, il est crucial d'avoir le bon équilibre entre les énergies renouvelables variables et les ressources disponibles, telles que le nucléaire et l'hydroélectricité, afin de permettre une infrastructure énergétique résiliente à long terme, a indiqué le directeur général de l'AEN, William Magwood ».

Annexe 2 - Surcoûts des raccordements aux réseaux et de compensation de l'intermittence de l'éolien et du PV selon Energy Pool Développement SAS
(Start-up spécialiste des solutions d'optimisation de consommation d'énergie)

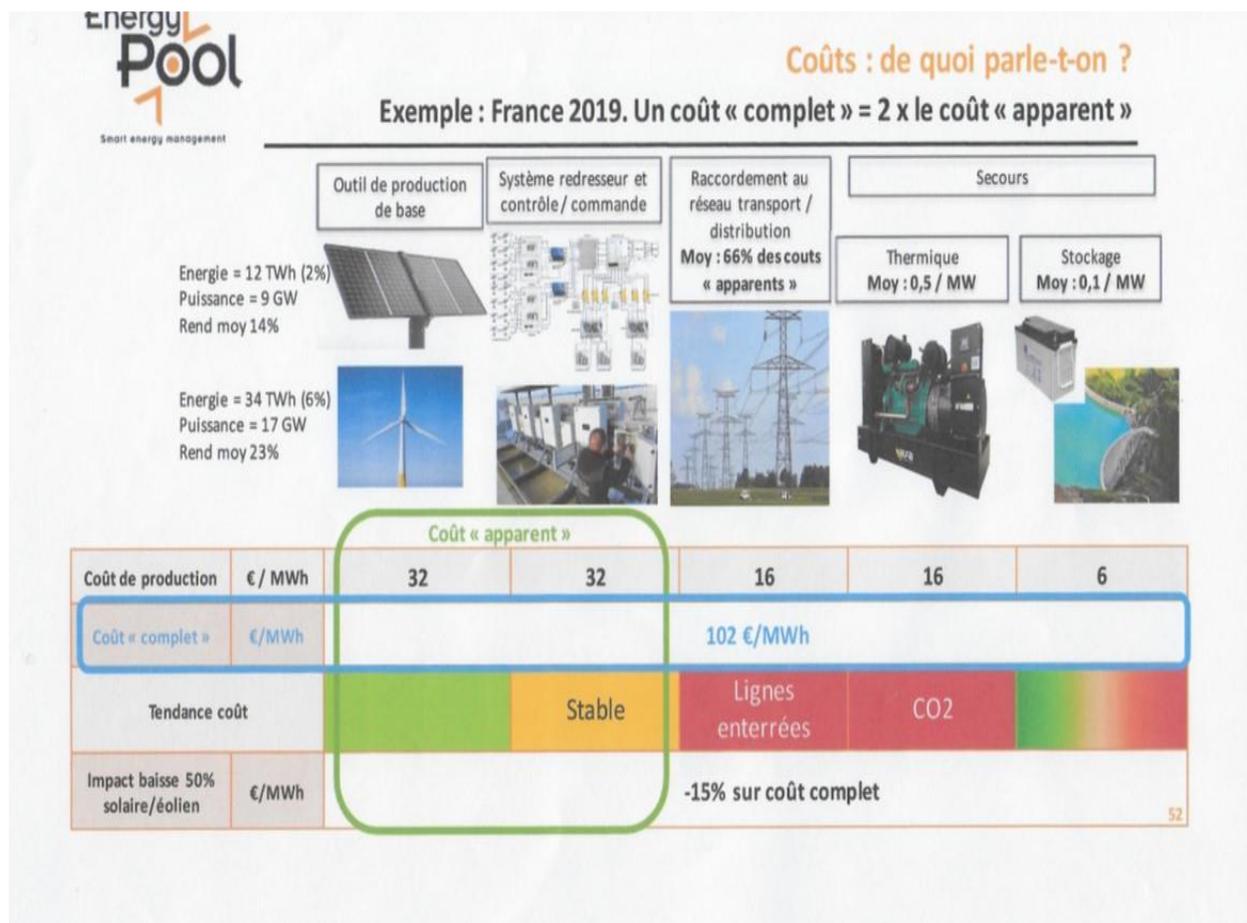


Figure 5 : Surcoûts système induits par les sources d'électricité intermittente en France en 2019 (en €/MWh) :

- 1) Surcoûts réseaux (raccordement au réseau de transport ou de distribution + renforcements associés)
- +
- 2) Surcoûts de compensation de l'intermittence par des moyens pilotables et/ou de stockage