

ÉVOLUTION DU BESOIN ÉNERGÉTIQUE EN FRANCE ET DANS LE MONDE

1. A-T-ON BESOIN D'ÉNERGIE ?

Energie vient du grec « *energeia* » qui signifie « *force en action* ». De tout temps, l'homme a eu besoin de l'énergie. Elle a été l'élément lui permettant de couvrir ses besoins, besoins vitaux dans un premier temps, puis besoins de confort pour les sociétés les plus avancées. Au début du 20^{ème} siècle, la découverte de la relativité a mis en évidence une relation directe entre matière et énergie. L'univers n'étant pas un système statique, il échange de l'énergie en se transformant perpétuellement. Nous n'échappons pas à cette règle. Nous sommes de l'énergie et avons besoin d'énergie pour exister.

2. DE COMBIEN D'ÉNERGIE A-T-ON BESOIN ?

Les systèmes vivants ont besoin d'un minimum d'énergie pour vivre et se reproduire. Pour l'homme, il lui faut de plus alimenter sa capacité créatrice qui est très consommatrice d'énergie¹ et qui lui donne sa supériorité. Combien a-t-il fallu d'énergie pour passer de l'homme des cavernes à l'homme du 21^{ème} siècle ?

De plus, la terre étant un système isolé, il est indispensable de penser le problème dans son ensemble et dès maintenant tenir compte de l'augmentation de la population qui atteindra 9.7 milliards d'individus dès 2050 dont 5 milliards qui voudraient consommer comme nous.

Quelles que soient les économies d'énergie que l'on peut imaginer, on voit que le besoin mondial ne peut qu'augmenter rapidement et devenir difficile à satisfaire à moyen terme sans la maîtrise de nouveaux concepts techniques et sociétaux.

3. DE QUELLE ÉNERGIE DISPOSE-T-ON ?

La terre dispose de deux sources : l'énergie externe qu'elle reçoit et l'énergie interne liée à son propre état.

Energie externe

L'énergie externe provient du rayonnement que reçoit la terre, essentiellement fourni par le soleil. L'énergie moyenne déposée dans la haute atmosphère est d'environ 340 W par m² dont 30 % repart dans l'espace. La température sur terre serait de -18° C sans l'effet de serre qui maintient cette température moyenne à 15°C (voir [fiche GAENA N° 14](#)). Ce dépôt énergétique peut être récupéré au niveau du sol soit directement sous forme de chaleur soit par conversion photoélectrique dans un matériau semi conducteur : c'est l'**Energie solaire directe** (voir [fiche GAENA N° 28](#)).

Grâce à des processus qui, alliés à la rotation de la terre, à l'action de la lune et à la présence d'espèces vivantes (plantes, animaux), il est possible de récupérer une partie de cette énergie de manière quasi instantanée ou différée :

Réchauffement de l'atmosphère avec création de vents	Energie éolienne (voir fiche GAENA N° 31)
Réchauffement de la mer avec les courants marins	Energie marine (voir fiche GAENA N° 44)
Phénomènes de marée (attraction lunaire)	Energie marée motrice (voir fiche GAENA N° 44)
Mise en œuvre du cycle climatique pluie neige	Energie hydraulique
Photosynthèse	Energie biomasse (voir fiche GAENA N° 40)
	Energie fossile

Les énergies fossiles sont le résultat de la biomasse accumulée et transformée pendant des centaines de millions d'années.

Energie interne

La Terre est un système qui dispose en son centre d'un noyau très chaud, la chaleur provenant principalement de la désintégration radioactive de l'uranium et du thorium présents depuis la création de la Terre il y a 5 milliards d'années.

¹ Par abus de langage on utilise la notion de « consommation d'énergie » alors qu'en réalité c'est une notion d'échange, la transformation d'une énergie en une autre énergie

Ce noyau est entouré d'un manteau isolant qui nous protège, mais qui en contrepartie limite le flux de chaleur et donc l'énergie que nous pouvons récupérer à sa surface : c'est l'énergie **géothermique**

Une très faible partie des éléments radioactifs ou de leurs descendants présents dans le noyau ont pu migrer vers la surface et sont récupérables pour les mettre en œuvre dans des réactions de fission nucléaire produisant de l'énergie sous forme de rayonnements et de chaleur. Il est possible d'associer à cette catégorie l'hydrogène et le deutérium qui font partie des éléments primordiaux de l'univers présents depuis l'origine de la Terre et qui peuvent être utilisés dans des réactions de fusion nucléaire également productrices d'énergie.

4. COMMENT METTRE EN ŒUVRE TOUTES CES ÉNERGIES ?

Tout d'abord, il faut rappeler que l'énergie ne disparaît pas quand nous l'utilisons (1^{er} principe de la thermodynamique) : elle est transformée dans une autre forme qui nous est utile : énergie cinétique, chaleur, énergie chimique par exemple. La première forme d'énergie utilisée par l'homme a été la biomasse. C'était le bois et la tourbe pour le chauffage et la cuisson des aliments. Puis l'énergie éolienne et l'énergie hydraulique ont été les principales sources énergétiques jusqu'au 18^{ème} siècle. Ce fut l'époque des moulins (à eau et à vent) qui ont permis d'augmenter nettement la quantité d'énergie disponible « gratuitement », notamment pour nourrir les populations.

L'utilisation du charbon et le développement industriel à partir du 19^{ème} siècle ont sonné le déclin des énergies traditionnelles, biomasse, hydraulique et éolien, au moins dans les sociétés modernes. Enfin l'exploitation du pétrole à partir de la fin du 19^{ème} siècle, par son haut potentiel énergétique et sa facilité d'utilisation, a donné à l'homme son autonomie et sa liberté de circulation, ainsi qu'une augmentation phénoménale de la quantité d'énergie disponible.

La découverte de l'électricité comme moyen de transport de l'énergie, a permis d'apporter cette énergie directement sur les lieux d'utilisation. Plus récemment, la mise en œuvre des réactions nucléaires de fission dans les réacteurs permet de produire de l'électricité et de la chaleur. Elle a également permis de réactiver les moyens abandonnés, au moins dans nos sociétés développées, comme l'hydraulique et l'éolien pour produire de l'électricité.

Actuellement on dispose des énergies fossiles en utilisation directe (charbon, pétrole, gaz) et des gaz de schiste², des sources renouvelables (biomasse, géothermie, solaire thermique, hydraulique) et de pratiquement toutes les autres sources d'énergie pour produire de l'électricité. L'hydrogène, dans sa forme de production actuelle, est considéré comme un vecteur d'énergie³.

5. QUELS SONT LES BESOINS ÉNERGÉTIQUES DANS LE MONDE ?

5.1. DÉFINITION DES DIFFÉRENTES ÉNERGIES

L'énergie primaire est celle qui est disponible de manière potentielle dans la nature avant toute transformation (bois, charbon, gaz, pétrole brut, vent, soleil, hydraulique, géothermique). **L'énergie finale** est l'énergie délivrée aux consommateurs (électricité au compteur, essence, gaz, gasoil, fuel, ...). Elle devient énergie utile après sa dernière conversion.

On introduit également la notion **d'énergie secondaire** lorsqu'il y a transformation d'une énergie en une autre énergie (charbon, pétrole, en électricité par exemple). Pour l'électricité provenant de sources non fossiles on utilise également la notion **d'énergie électrique primaire**.

La figure 1 ci-dessous montre l'évolution de la consommation mondiale en Mtep⁴ des deux énergies primaires et finales sur les 50 dernières années. Les écarts grandissants entre les deux courbes viennent en grande partie de la

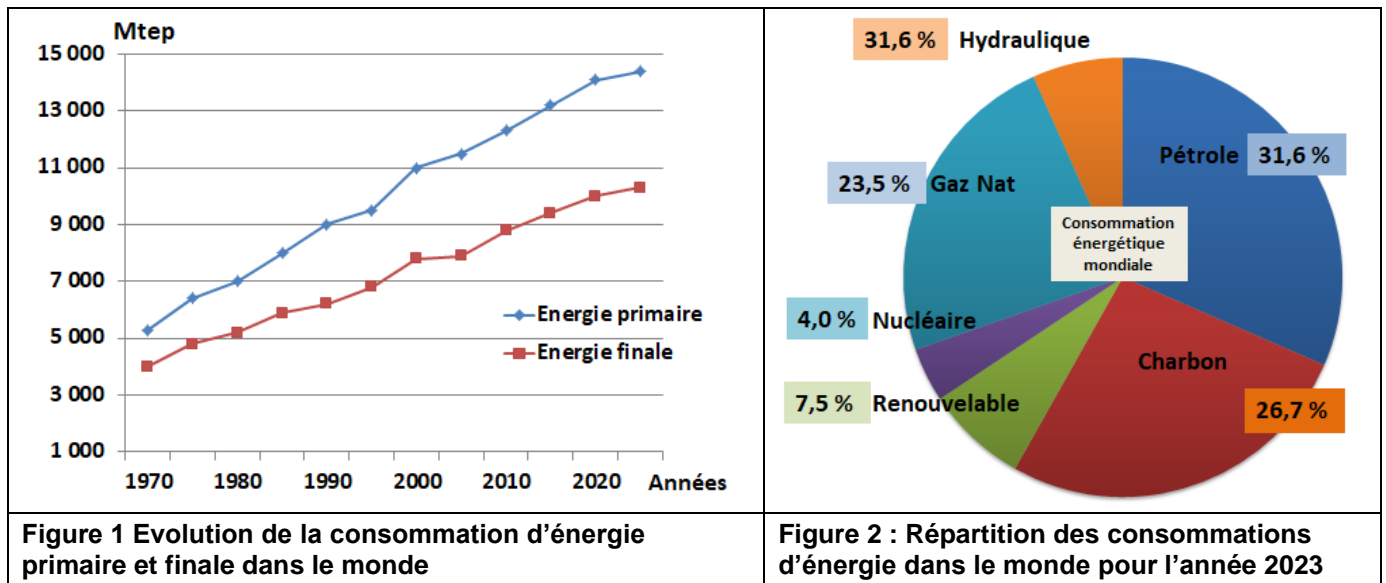
² Les gaz de schiste, dont la prospection est actuellement interdite en France, pourraient, à l'avenir prendre une part importante dans le bilan énergétique français. Ils sont exploités depuis plusieurs dizaines d'années dans certains pays.

³ L'hydrogène n'existe pas à l'état naturel sous une forme libre. Il est toujours associé à d'autres éléments. Actuellement il est produit à 95 % à partir de combustibles fossiles avec une forte production de CO₂ (Gazéification du charbon, reformage du méthane). Les autres techniques décarbonées sont les cycles thermochimiques avec cogénération électricité-hydrogène et l'électrolyse de l'eau (électrolyse de la vapeur d'eau à haute pression). Ces techniques de production font que l'hydrogène est actuellement considéré plus comme un vecteur d'énergie.

Mais les nouvelles techniques par photosynthèse (photo fermentation micro-algues + bactéries + lumière) en feront une source d'énergie à part entière. Malgré les difficultés, la recherche sur la photosynthèse artificielle laisse entrevoir une issue prometteuse. L'hydrogène est également un moyen de stocker l'électricité et ainsi de gérer l'intermittence des énergies renouvelables. Il est utilisé directement comme carburant dans les moteurs ou dans les piles à combustible pour refaire de l'électricité, avec un rendement global très faible.

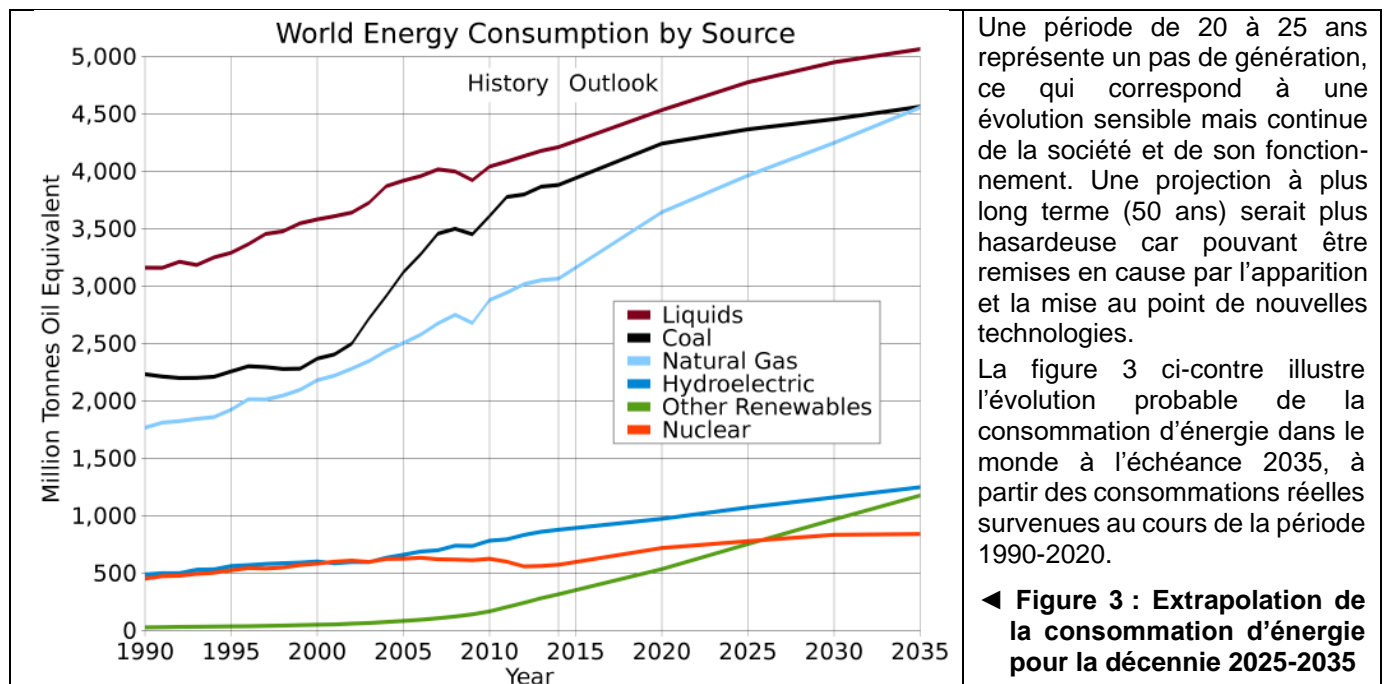
⁴ **Mtep** : Mégatonne équivalent pétrole = million de tonnes équivalent pétrole. 1 Tep = 11 700 kWh.

transition de plus en plus importante des énergies fossiles vers électricité⁵. La Figure 2 donne la répartition par source d'énergie pour l'année 2023.



En 2022, l'électricité d'origine nucléaire représentait au niveau mondial un peu plus de 10 % de la consommation totale d'énergie (voir figure 5). En France, la production d'électricité nucléaire représentait 36 % de la consommation totale d'énergie primaire (voir figure 6).

5.2. ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION MONDIALE SUR LA PROCHAINE DÉCENNIE



Un futur assez problématique : De manière assez surprenante, les grandes perspectives énergétiques mondiales, de l'Agence internationale de l'Énergie, du Département de l'Énergie Américain, du Conseil mondial de l'Énergie, de la Commission européenne, sont assez convergentes pour le futur énergétique mondial à 2050. Cela est vrai au moins pour les projections dites « *business as usual* » (soit, « *au fil de l'eau* »), c'est-à-dire les projections sans inflexion des politiques énergétiques. Pour la période 2000-2050, elles prédisent une augmentation de la population mondiale de 50 %, à 9-10 milliards ; un PIB mondial multiplié au moins par quatre ; une consommation mondiale d'énergie multipliée par deux, à 20-22 GTep, soit 2,1 Tep/hab. On remarquera que de tels scénarios supposent en eux-mêmes des gains d'efficacité énergétique très significatifs, puisqu'il faut déjà diviser par deux l'intensité énergétique du PIB.

⁵ Le rapport entre énergie finale et énergie primaire est de 10 % pour le pétrole et le charbon, de 20 % pour le gaz naturel compte tenu de transport, et de 25 à 60 % pour la production de chaleur et la conversion en électricité.

Mais le problème majeur est que ces scénarios supposent toujours un fort appel aux énergies fossiles : si le pétrole et le gaz conventionnel connaissent un plateau de production – plutôt qu'une nette décroissance à partir de 2030-2040, et malgré la progression du nucléaire et des renouvelables, il faudra recourir de manière massive au charbon et aux hydrocarbures non conventionnels (gaz et pétrole de schistes notamment). Cette situation conduira à une accélération de l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère et de son impact sur le climat. D'où la nécessité impérieuse de quitter cette trajectoire et d'engager la transition énergétique qui devrait conduire non au doublement mais à la division par deux des émissions mondiales en 2050 : il s'agit d'un programme extraordinairement ambitieux qui impacterait très fortement les modes de vies dans les sociétés industrielles.

Evolution de la demande énergétique mondiale : Les facteurs qui pèsent sur l'évolution de la demande d'énergie dans le monde sont :

- l'accroissement de la population mondiale (10 milliards d'habitants à l'horizon 2050 mais avec une stabilisation puis une décroissance à partir de 2080),
- les efforts des pays en voie de développement pour combler leur décalage économique par rapport aux pays occidentaux et améliorer le bien-être de leur population ; toutefois après avoir connu des taux de croissance de près de 10% dans les années 2000-2010, ces taux devraient fortement baisser à l'avenir, et se stabiliser vers 2 à 4% par an d'ici 2050
- du maintien d'une légère croissance de la demande énergétique dans les pays développés, la demande d'énergie primaire poursuit sa croissance mais sa répartition géographique se modifie.

C'est ainsi que la zone Asie-Pacifique absorbe aujourd'hui plus de 30 % de la consommation mondiale contre moins de 20 % au début des années soixante-dix. Corrélativement, le poids relatif des régions développées diminue (USA de 28 à 20 %, Union Européenne de 19 à 15 %).

Les experts tablent sur une croissance moyenne de l'ordre de 1,7 % par an pour les prochaines décennies ce qui conduit à prévoir le doublement de la demande mondiale soit une consommation de 20 milliards de tep dans les années 2040 – 2050.

Dans cette augmentation de la demande d'énergie primaire, la part des pays en voie de développement (Chine, Inde, Brésil, ...) représentera plus de 70 %. (source : [Planetoscope](#))

5.3. RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION DANS LE MONDE

La Figure 4 ci-contre donne une projection à l'horizon 2030 de l'évolution de la consommation d'énergie dans les différentes régions du monde. On note une forte progression des pays asiatiques due à la croissance économique des pays en développement et notamment de la Chine et de l'Inde. Les pays d'Amérique du nord maintiendront probablement leur rythme de croissance de consommation, tandis que les pays européens, à faible croissance démographique et sensibilisés par les économies d'énergie et l'écologie, resteront sur un rythme plus modéré.

Comme indiqué plus haut ces projections sont incompatibles avec une réduction des émissions des gaz à effet de serre.

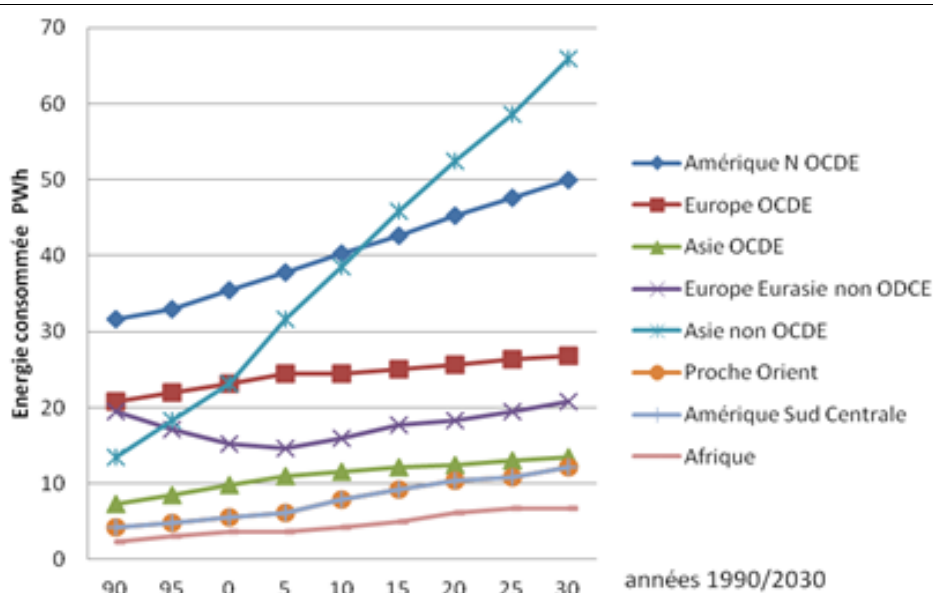


Figure 4 : Evolution de la consommation d'énergie dans les différentes régions du monde en PWh⁶

⁶ **PWh** : Pétawatt heure = 10¹² kWh = million de million de kWh.

Le tableau 1 donne quelques estimations de l'évolution de cette consommation par région mondiales sur les 10 prochaines années.

Evolution	Pays asiatiques hors OCDE	Amérique du nord	Europe OCDE
% sur 10 ans	30	12	8
% par an	3,0	1,2	0,8

Tableau 1 : Evolution en % de la consommation sur 10 ans

La moitié environ de l'augmentation de la demande mondiale en 2030 sera imputable à la production d'électricité et le cinquième aux besoins des transports notamment sous forme de combustibles à base de pétrole.

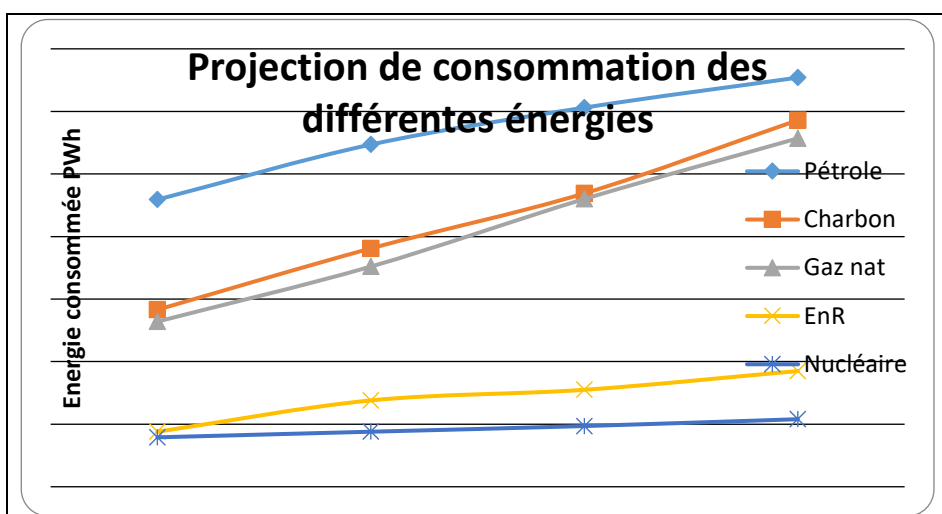
5.4 PROJECTION PAR SOURCES D'ÉNERGIES

La forte demande des pays en développement conduira sans aucun doute à un fort renchérissement des énergies fossiles sur les prochaines décennies.

De 125 PWh d'énergies primaires consommées dans le monde en 2000, le besoin a atteint 180 PWh en 2020, soit une augmentation de 45 % en 20 ans.

La figure 5 ci-contre donne les prévisions d'évolution de la consommation des différentes sources d'énergies entre 2010 et 2030.

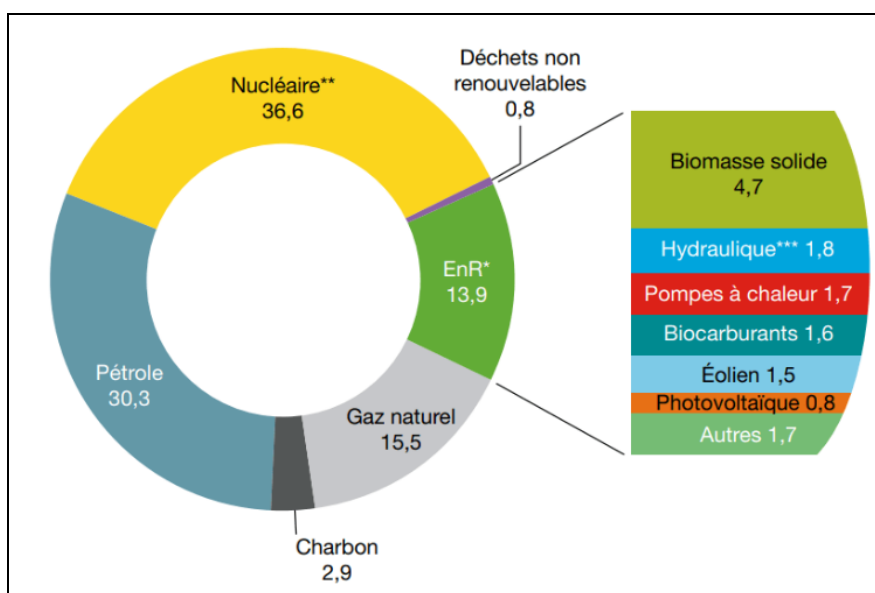
Figure 5 : Projection des consommations énergiques mondiales par origine ►



Comme indiqué plus haut ces projections sont incompatibles avec une réduction des émissions des gaz à effet de serre.

5.5 ÉVOLUTION SUR LES 3 DERNIÈRES DÉCENNIES

La consommation d'énergie primaire de la France s'établit à 2 544 TWh en 2022 (Chiffres clé de l'énergie – édition 2023 – Ministère de la Transition énergétique). Ce bouquet énergétique français est indiqué sur la Figure 6 ci-dessous.



À noter que le bois-énergie, qui représente la quasi-totalité de la biomasse solide (5 % de la consommation primaire), demeure la première source d'énergie renouvelable consommée en France, loin devant l'électricité d'origine hydraulique. Il est quasi exclusivement dédié au chauffage.

◀ **Figure 6 : Bouquet énergétique primaire de la France en 2022** Source : SDES

Après avoir régulièrement augmenté jusqu'en 2005, la consommation d'énergie primaire commence à diminuer lentement, de façon régulière (Voir Figure 7). L'évolution sur le long terme est différenciée selon les énergies : depuis

1990, les consommations de charbon et de pétrole ont reculé respectivement de 68 % et 24 %. À l'inverse, la consommation de gaz naturel a augmenté de 35 % tandis que l'énergie d'origine renouvelable (solaire, éolien, hydraulique) a plus que doublé.

En 2022, la consommation primaire en France se contracte fortement en raison principalement de la baisse conjoncturelle de la production d'électricité d'origine nucléaire et hydraulique (non compensée par les importations). Elle diminue de 7,5 %, une baisse d'ampleur à peine inférieure à celle observée lors de la crise sanitaire en 2020 (- 8,4 %). Au-delà de cette forte baisse qui reste conjoncturelle, la tendance à une lente décroissance devrait se poursuivre. Ces variations sont cependant à moduler selon les secteurs ; si elles restent orientées à la baisse dans les transports, l'industrie et le tertiaire, elles stagnent dans le transport et l'agriculture et alors qu'elles augmentent légèrement dans le résidentiel. Ces tendances générales sont similaires à celles observées dans les principaux états de l'Europe occidentale (Allemagne, Royaume Uni, Suède, Espagne, Italie).

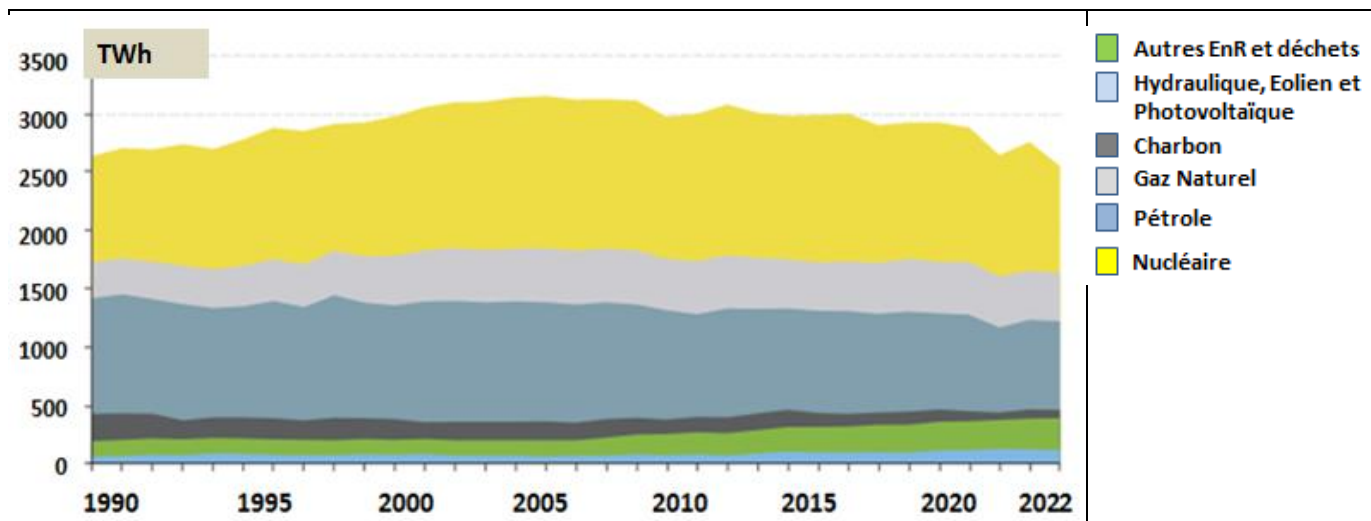


Figure 7 : Evolution de la consommation d'énergie primaire en France entre 1990 et 2022

Source : SDES

5.6 PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION À L'ÉCHÉANCE 2035/2050

La Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV), et la *Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC)* prévoient que la consommation d'énergie finale de la France doit diminuer de 40 % d'ici à 2050. Pour atteindre cet objectif, il faut à la fois transformer l'économie et les modes de vie et restructurer le système permettant à l'électricité de remplacer les énergies fossiles comme principale énergie du pays.

C'est dans ce cadre que RTE a produit une étude « **futur énergétique 2050** » [Réf. 5], dans laquelle différents scénarii permettant d'atteindre la neutralité carbone en 2050, avec comme donnée d'entrée l'arrêt des consommations énergétiques d'origine fossile en 2050, ont été modélisés. L'étude a conduit à une hausse modérée de la consommation d'électricité de 35 % en 30 ans. La consommation finale électrique atteignant alors **645 TWh en 2050** (trajectoire de référence), ce qui représente 55 % du mix énergétique consommé contre 25 % aujourd'hui, alors que la consommation d'énergie devrait diminuer de 40 % et atteindre environ **930 TWh** (voir Figure 8).

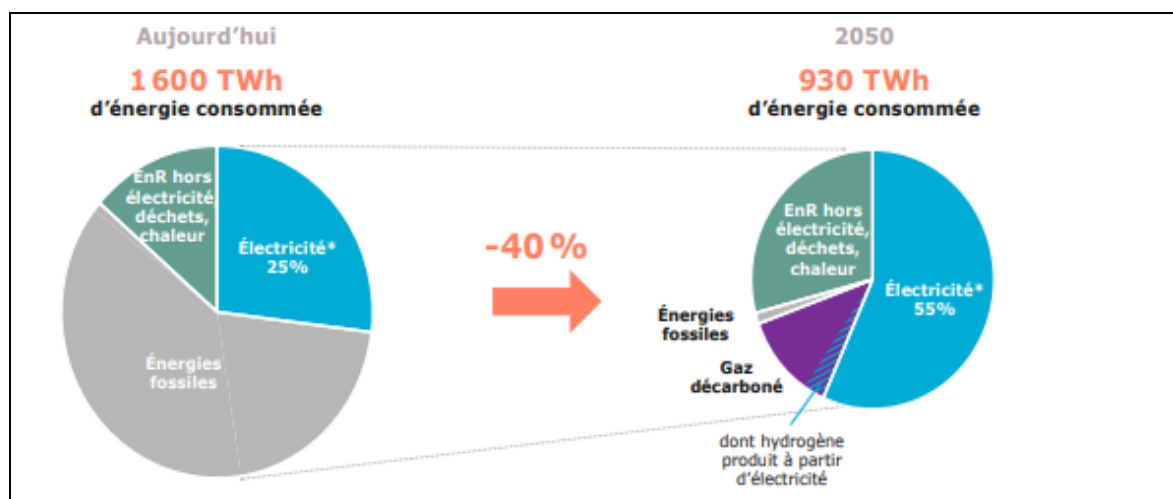


Figure 8 : Consommation d'énergie finale en France à l'horizon 2050 Source SNBC

Depuis cette date, RTE a publié de nouvelles études⁷ qui modifient légèrement ces conclusions. À l'échéance 2035 selon les scénarios envisagés, la consommation électrique pourrait tourner autour de la fourchette **500 à 630 TWh**.

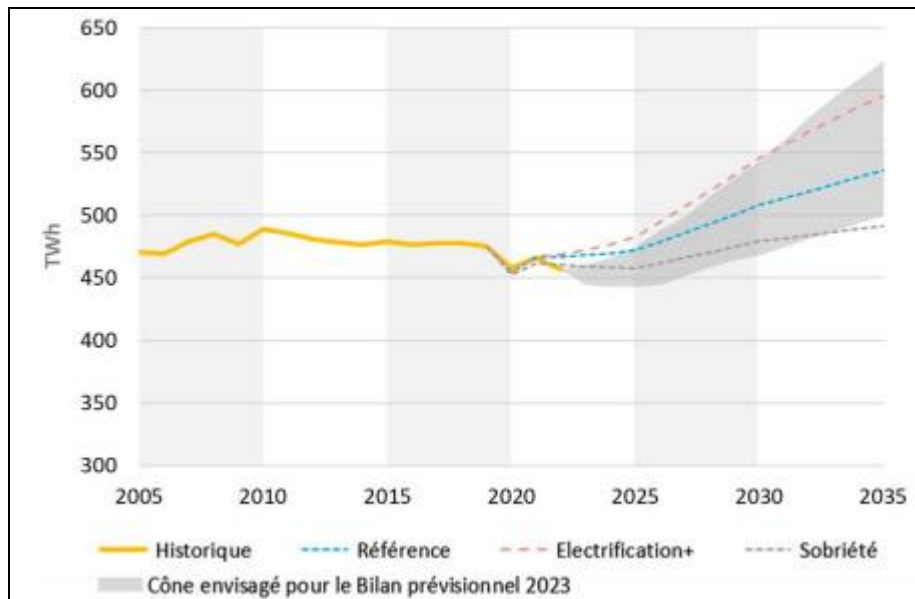


Figure 9 : Projections d'évolution de la consommation intérieure d'électricité à l'échéance 2035

La trajectoire de référence pour la consommation d'énergie repose sur des progrès substantiels d'efficacité énergétique et le remplacement des énergies fossiles par des alternatives bas-carbone (électricité et biomasse).

Elle prévoit une augmentation relativement régulière de la consommation électrique, avec une tendance à l'accélération progressive (taux de croissance annuel moyen de 0,6 % sur la décennie 2020, de 1,1 % sur la décennie 2030 et de 1,3 % sur la décennie 2040). Ce scénario de consommation combine des évolutions très différenciées selon les secteurs. D'une part, la consommation électrique de trois secteurs est orientée très fortement à la hausse du fait des nouveaux usages électriques : les transports (+ 85 TWh sur la période), l'industrie (+ 65 TWh) et la production d'hydrogène (+ 50 TWh).

Dans le même temps, certains secteurs fortement consommateurs historiques (résidentiel, tertiaire) pourraient diminuer sous les effets de la recherche de l'efficacité énergétique. Par ailleurs, la production d'hydrogène serait considérée comme intégralement pilotable, à l'instar des recharges des véhicules électriques et des usages industriels.

L'Académie des Sciences prévoit dans son rapport de juillet 2021 que le besoin électrique devrait se situer en 2050 entre 700 et 900 TWh, 700 TWh étant le minimum acceptable pour aborder la transition énergétique (voir [Fiche d'actualité GAENA n° 21](#) « Apport de l'énergie nucléaire dans la transition énergétique »).

L'analyse effectuée par le GAENA montre que les estimations électriques à l'horizon 2050 sont sous évaluées d'une **centaine de TWh** et bien davantage si on était amené à électrifier tout ou partie du parc de poids lourds circulant en France⁸ (véhicules français ou d'origine étrangère (Voit [Fiche d'actualité GAENA N° 24](#)).

6. SUR QUELS CRITÈRES CHOISIR LES MOYENS ÉNERGÉTIQUES DU FUTUR ?

Le choix de la politique énergétique dépendra :

- des besoins vitaux des populations ce qui est fondamental pour les pays du tiers monde. Le doublement de la consommation énergétique semble réaliste et indispensable pour les pays en voie développement,
- de paramètres techniques tels que :
 - le prix de l'énergie
 - la capacité de production
 - la production de gaz à effet de serre (GES), comme le CO₂, facteurs de réchauffement climatique
- et de paramètres plus subjectifs comme :

⁷ <https://assets.rte-france.com/prod/public/2023-03/2023-03-01-bilan-previsionnel-2023-consultation-publique.pdf>

⁸ Dans le cas d'une électrification totale des poids lourds la sous estimation faite par RTE pourrait atteindre **445 à 485 TWh**.

- les risques majeurs
- la protection des paysages et de l'environnement

7. QUELQUES RÉFLEXIONS SUR LES PROBLÈMES D'ÉNERGIE

Dans nos sociétés avancées, le problème de l'énergie semble pour beaucoup très simple, tourner le bouton électrique ou le robinet de gaz, faire le plein à la pompe... Pourtant l'accès à l'énergie soulève des problèmes scientifiques, techniques et sociétaux très complexes d'où les débats et les compromis difficiles que nous connaissons ; réchauffement global de la terre, déchets nucléaires, énergies alternatives, économie d'énergie, adaptation de l'offre (la production) aux besoins (la consommation), capacités de stockage, modèle de société, ...

Les problèmes vont aussi se présenter de façon très différente pour ceux qui ont déjà accès à l'énergie et ceux qui aspirent tout simplement au minimum vital, ce qui est le cas pour plus de la moitié de l'humanité.

7.1. COMBUSTIBLE FOSSILE ET CO₂

Il est à peu près admis que le 21^{ème} siècle verra la fin de l'utilisation du pétrole et du gaz, au moins pour la production d'énergie. Toutefois, il faut noter que le pétrole et le gaz resteront indispensables dans de nombreux processus industriels tels que la fabrication d'objets et d'engrais, sans que des procédés de substitution soient envisageables à court et moyen terme. Quant au charbon, il en subsistera encore de grandes quantités réparties de façon plus ou moins homogène sur la planète et facilement accessibles, auquel se rajoute maintenant les gaz de schistes.

Au début 2024, sa teneur dans l'atmosphère vient de dépasser 420 ppmv (parties par million en volume) alors que, depuis 400 000 ans, il oscillait entre 180 ppmv pour les périodes glaciaires et un maximum de 280 ppmv pour les périodes chaudes. Les scientifiques du GIEC⁹ prévoient une augmentation de la température moyenne de l'ordre de 3°C d'ici la fin du siècle et plus si l'on ne parvient pas à réduire très rapidement les émissions de CO₂.

Un tel réchauffement, s'il ne peut que réjouir les vacanciers et amateurs de plage, pourrait induire la fonte des glaces et le dégel du permafrost avec un fort dégagement de méthane¹⁰, ainsi que la montée des eaux et la désertification de certaines régions qui vont entraîner des déplacements importants de populations. Ces phénomènes vont se produire avec une rapidité peu compatible avec l'évolution des espèces et de la société humaine.

7.2. L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE DE FISSION

Le nucléaire, qui n'est pas producteur de CO₂, pourrait être une réponse à ce problème. Cette énergie ne représente, actuellement dans le monde, que 5 % de la production au niveau primaire. Il est très probable que cette énergie aura tendance à se développer pour satisfaire aux besoins, mais se pose alors le problème de l'approvisionnement en combustible nucléaire (essentiellement l'uranium pour l'instant) des filières actuelles.

Il sera donc nécessaire de passer à des technologies de réacteurs exploitant de manière plus efficace les matières fissiles existantes, en utilisant directement l'uranium naturel, en intégrant le thorium comme combustible, ce qui assurera une source d'énergie pour des siècles, et en consommant du plutonium produit dans les réacteurs actuels qui se trouvera ainsi recyclé. C'est tout l'enjeu des recherches sur les réacteurs de 4^{ème} génération¹¹, dont les réacteurs à neutrons rapides (voir la [fiche argumentaire GAENA N° 28](#)).

L'avenir du nucléaire repose également sur une meilleure intégration de la sécurité, ce qui devrait être satisfait avec ces nouvelles filières, ainsi qu'une plus grande adhésion des populations dans la mise en œuvre de cette technologie.

7.3. L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE

Il existe une grande quantité d'énergie stockée dans les roches sous forme de chaleur. Mais cette énergie est relativement diluée et donc difficilement exploitable. Les sources de chaleur produisant directement de la vapeur susceptible de produire de l'électricité sont rares (c'est le cas de l'Islande par exemple). L'utilisation de cette énergie pour le chauffage se heurte à deux problèmes : soit la source de chaleur est performante mais en général éloignée de l'utilisation, soit elle est faible (débit – température) avec un mauvais rendement. Cette énergie ne peut être qu'une énergie d'appoint (voir [fiche argumentaire GAENA N° 54](#)).

7.4. L'ÉNERGIE HYDRAULIQUE

⁹ GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

¹⁰ Le méthane CH₄ est un gaz ayant un pouvoir réchauffant beaucoup plus important que le CO₂.

¹¹ L'arrêt définitif du nucléaire posera le problème de la gestion du Pu déchet à très longue durée de vie.

L'électricité d'origine hydraulique est sans aucun doute l'énergie la plus propre en matière d'émission de CO₂, avec un rendement élevé (85% de l'énergie potentielle contenue dans l'eau turbinée dans la retenue en amont est convertie en électricité). Dans les pays les plus développés, les sites les plus performants (hauteur de chute, volume et remplissage du barrage de retenue en amont) sont presque tous exploités et souvent éloignés des régions peuplées, nécessitant des infrastructures de distribution de l'électricité imposantes. Les tentatives d'extension de ces sites ou d'implantation de barrages dans de nouveaux sites font souvent l'objet de fortes oppositions locales, le plus souvent pour des motifs environnementaux.

Un exemple emblématique de cette situation est donné par la Chine. Ce pays possède déjà 24.000 barrages. Après le barrage des Trois Gorges¹², la Chine a construit deux autres barrages, le barrage le Lianghekou et le barrage de Baihetan le plus haut du monde et deux autres sont en projet. Cela représentera une puissance cumulée installée de 39 GW qui produit actuellement 18 % de l'électricité du pays. Se pose toutefois le problème du déplacement de populations de plusieurs millions d'habitants, l'inondation de zones fertiles, une profonde modification des écosystèmes ainsi que le risque latent de rupture d'un de ces énormes barrages aux conséquences inimaginables.

En France, l'essentiel des barrages ont été construits dans les années 1960-1980 et l'investissement initial consenti par l'Etat est largement amorti. Les coûts de production sont donc essentiellement les coûts de maintenance qui, si elle est correctement réalisée, permet d'envisager des durées de vie de ces installations largement supérieures à 100 ans, ce qui constitue un outil industriel intéressant. La plupart des barrages sont la propriété de l'Etat, et leur exploitation fait l'objet de concessions. Il se trouve que de nombreux renouvellements de ces concessions vont avoir lieu dans les décennies 2020-2040. L'enjeu actuel est donc les modalités de ces renouvellements, qui attirent bien des convoitises. Ainsi s'affrontent 2 logiques :

- celle de l'Etat français qui souhaite garder la maîtrise de ces installations via un exploitant qu'il peut contrôler (EDF en l'occurrence).
- celle de la Commission européenne qui souhaite la poursuite de l'ouverture complète du marché de l'électricité à la concurrence.

Une difficulté récurrente ces dernières années en France est une baisse de la ressource en eau (pluies, fonte des neiges) permettant de remplir les réservoirs en amont. Cette contrainte peut être diminuée en mettant en œuvre des STEP (Station de Transfert d'Energie par Pompes). Dans ces installations, une partie de l'eau récupérée en aval du barrage est renvoyée dans la retenue en amont du barrage pour être de nouveau turbinée quand un besoin de production électrique apparaît.

Ce transfert s'effectue en faisant tourner de puissantes pompes de relevage alimentées par de l'électricité produite par des moyens non pilotables quand la production excède la consommation et dont le coût est faible. Ceci permet de maintenir la réserve d'eau en amont à un haut niveau de remplissage et de bénéficier d'une capacité de production électrique complémentaire bien utile en période de déséquilibre entre la production et la consommation, avec les risques de blackout associés. Ce dispositif peut donc être considéré comme un moyen de stockage de l'énergie, avec un rendement et des capacités élevés, sans équivalent avec les autres technologies actuellement disponibles (hydrogène, condensateur, piles ou accumulateurs).

L'avantage de ce système est triple :

- Le niveau d'eau dans la retenue en amont peut être maintenu haut plus longtemps qu'en ne comptant que sur l'approvisionnement naturel (pluie, fonte des neiges)
- Le temps de réaction du dispositif est rapide : quelques minutes pour ouvrir les vannes et lancer les alternateurs
- Le coût de production est faible d'autant qu'il est possible de jouer sur le différentiel entre le prix de l'électricité nécessaire pour remplir la retenue amont – qui peut être très faible voire négatif – et le prix de vente de l'électricité qui peut être élevé si elle intervient en période de production insuffisante.

La France dispose actuellement de 6 grosses installations de ce type, essentiellement dans les Alpes. La puissance disponible est de 5 GWe qui permet de produire plus de 100 GWh pendant une trentaine d'heures, ce qui représente 6% de la consommation française pendant cette période. Bien que modeste, cette contribution est très appréciable en période de risque de blackout.

7.5. L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

L'énergie éolienne est une énergie irrégulière et non pilotable qui ne fonctionne que dans une certaine gamme de vitesse du vent. Ainsi, sur un an, une éolienne ne produit en moyenne qu'environ 20 % de l'énergie qu'elle pourrait produire si elle fonctionnait tout le temps à 100 % de sa puissance nominale. Le caractère intermittent et aléatoire du

¹² Barrage des 3 Gorges. 40 milliard de m³ d'eau, surface du réservoir 1084 km² inondation de 600 km² de terre agricole, engloutissement de 1300 sites historiques, plusieurs millions d'habitants sous le barrage.

vent nécessite d'avoir une production complémentaire (turbines à gaz en général) pour pallier les aléas du vent et nécessite une gestion très complexe compte tenu du caractère dilué de cette énergie.

Les éoliennes marines ont un fonctionnement plus régulier mais les zones d'implantation sont limitées et posent des problèmes de maintenance et d'usure accélérée. Le développement de moyens de stockage de l'électricité, production d'hydrogène par exemple, apportera beaucoup d'intérêt à ce type d'énergie quand les capacités de stockage seront à la hauteur des besoins, ce qui est très loin d'être le cas à court et moyen terme (voir [fiche argumentaire GAENA N° 31](#)). A court terme, la forte augmentation de la part de l'éolien (et aussi du solaire) dans le mix énergétique ne sera viable que si d'autres moyens de production électrique réellement pilotables - c'est-à-dire capables d'ajuster finement et en temps réel la quantité totale d'électricité produite à la quantité consommée – sont disponibles.

Un dernier point à considérer est la durée d'exploitation économiquement rentable de ces dispositifs qui semble se situer entre 15 et 25 ans, suivant le REX acquis dans les pays pionniers tels que le Danemark, la Grande Bretagne et l'Allemagne. Le renouvellement des parcs éoliens les plus anciens devient donc une question importante en Europe, qui pose la question du mode de financement, et de l'acceptabilité du public pour ces travaux.

7.6. L'ÉNERGIE SOLAIRE

L'énergie solaire est une énergie réellement inépuisable et abondante¹³ et cependant elle ne représente que 0,04 % de la consommation d'énergie au niveau mondial. Ceci est dû à son caractère alterné (jour-nuit) et à son faible rendement dans les zones tempérées où les besoins sont les plus forts. L'utilisation la plus directe est le chauffage des habitations et de l'eau sanitaire. Le développement des panneaux solaires thermiques associés à une bonne conception de l'habitation permettrait un gain important sur le chauffage domestique et des économies de combustibles fossiles.

Il existe aussi des centrales solaires permettant de produire de l'électricité (Chauffage d'un fluide à plusieurs centaines de degrés pour produire de la vapeur) mais ce type d'installation n'est performant que dans les zones désertiques et très ensoleillées (voir [fiche argumentaire GAENA N° 28](#)).

Enfin les capteurs photovoltaïques transforment directement la lumière en électricité. Bien que le rendement ne soit pas très élevé (inférieur à 15 %) c'est un moyen bien adapté aux zones très ensoleillées et qui peut apporter un minimum de confort aux populations isolées. Les principaux obstacles au développement à court terme de ce système pour produire massivement de l'électricité sont :

- Le coût de fabrication des capteurs, qui, bien qu'il diminue constamment, reste bien supérieur par kWh produit aux autres technologies (éolien, hydraulique, nucléaire, fossiles)
- La fabrication des capteurs qui fait appel à de hautes technologies onéreuses, polluantes et énergivores,
- L'éloignement des zones de production des zones de consommation, ce qui nécessite des lignes de transport coûteuses et dont le rendement (perte par effet joule) peut devenir prohibitif, sauf si une solution de stockage est mise en place,
- Le rendement global qui reste modeste, si l'on compare l'énergie investie dans la fabrication des capteurs à l'énergie mise à disposition du consommateur. Il faut 5 ans de fonctionnement du capteur pour qu'il compense l'énergie qu'il a fallu consommer pour le fabriquer, alors la durée de vie des capteurs est estimée entre 10 et 20 ans suivant l'environnement de fonctionnement (température notamment). Des recherches sont en cours pour augmenter le rendement et baisser le coût de fabrication (utilisation des nanotechnologies).

7.7. L'ÉNERGIE BIOMASSE

Actuellement la biomasse repose essentiellement sur l'utilisation du bois et la production de divers alcools et huiles agricoles issues de cultures vivrières (alcoocarburants). C'est une énergie renouvelable et sur le principe non productrice de CO₂ car le gaz dégagé est ensuite refixé par les nouvelles végétations.

Toutefois ce caractère globalement non producteur de CO₂ dépend beaucoup du mode de croissance et de culture des espèces végétales concernées et de leur environnement. Mais le rendement de la photosynthèse est inférieur à 0,5 % ce qui impose que les surfaces en réserve (replantation et croissance de la forêt) soient suffisamment importantes ce qui n'est pas le cas puisque l'on constate actuellement, plutôt une déforestation (voir [fiche argumentaire GAENA N° 40](#)).

La production des *agrocarburants* se fait bien souvent au détriment des cultures alimentaires traditionnelles et compte tenu des méthodes actuelles de production (mécanisation, engrais etc.) le rendement est quasiment nul.

¹³ En 12 heures, l'énergie solaire arrivant sur terre est supérieure au total des énergies fossiles connues et prévisibles.

Les *biocarburants* reposent sur une culture spécifique n'entamant pas les ressources alimentaires. Mais le développement de cette production est encore faible. Le futur repose sur le développement des *algocarburants* obtenu par photo-fermentation d'algues elles-mêmes fortes consommatrices de CO₂. Il est cependant intéressant de noter l'énergie biomasse représente actuellement 10 % de la production mondiale d'énergie.

8. CONCLUSION

Cette analyse montre que dans les 20 prochaines années la consommation d'énergie mondiale continuera à croître, très fortement dans les pays en voie de développement, beaucoup moins en Europe qui s'engage progressivement dans une politique d'économie d'énergie, voire de rationnement des besoins.

La projection de la consommation d'énergie en France pour les deux décennies à venir n'est pas certaine, car elle dépendra des choix politiques, économiques, sociaux et environnementaux qui seront faits. L'objectif commun est de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de favoriser la transition vers les énergies non émettrices, tout en garantissant la sécurité d'approvisionnement et la compétitivité économique.

L'inventaire des différentes énergies actuellement à notre disposition montre les avantages et les limitations de chacune d'entre elles, à des prix abordables. Voilà le challenge de notre siècle.

9. SOURCES

[Réf. 1] : **OCDE** : Organisation de Coopération et de Développement Economique

[Réf. 2] : **GOUV** : Commissariat général au développement durable - SDES (Service des données et études statistiques)

[Réf. 3] : **EIA** : Energy Information Administration

[Réf. 4] : Rapport RTE Bilan prévisionnel « Futurs énergétiques 2050 : les scénarios de mix de production à l'étude permettant d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 » : <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques>

[Réf. 5] : **RTE** : Futurs énergétiques 2050 Principaux résultats Octobre 2021

[Réf. 6] : **Wikipedia**

[Réf. 7] : [BP Energy Outlook 2035](#)