

FRANCE : QUELLE ÉNERGIE POUR DEMAIN ?

1. ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION DANS LE MONDE

Toutes les études des organismes internationaux montrent une forte augmentation du besoin énergétique dans le monde pour les 20 prochaines années (voir [fiche GASN N° 2](#)).

Cette augmentation se fera sur un rythme de 3,5 % par an pour les pays asiatiques tirée en particulier par la Chine et l'Inde. Pour l'Amérique du nord, qui maintiendra sans doute son rythme de croissance, l'évolution devrait s'établir autour de 1,2 % par an.

Par contre, en Europe qui est lancée dans une politique d'économie d'énergie, l'augmentation devrait s'établir en moyenne autour de 0,5 % par an. La France suivra sans doute ce rythme d'évolution.

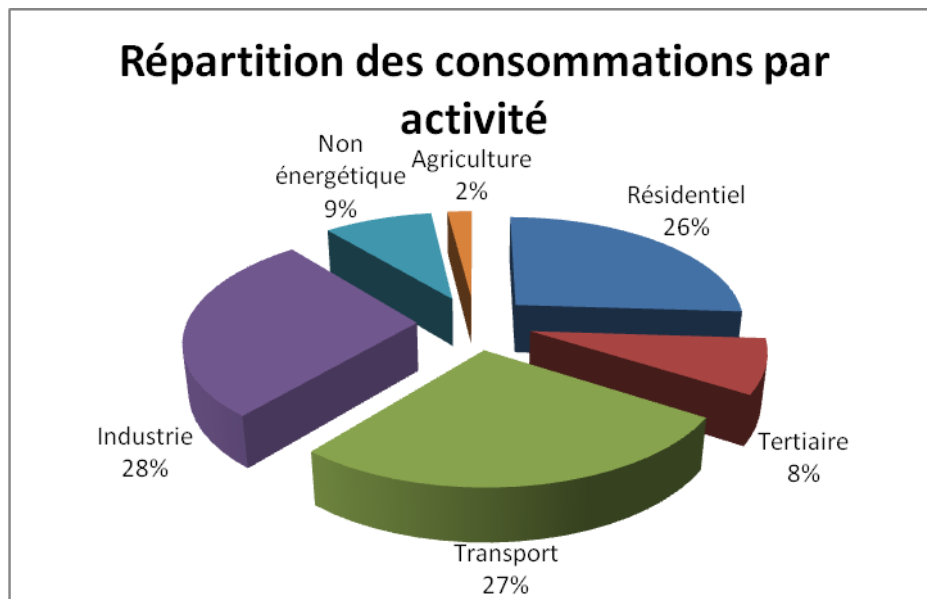
2. BILAN SUR LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE ACTUELLE EN FRANCE

2.1. RÉPARTITION PAR SECTEUR D'ACTIVITÉ

Le graphique 1 ci-dessous donne la répartition des énergies consommées actuellement en France.

On constate deux postes importants qui, à eux seuls, consomment la moitié de l'énergie.

Ce sont le résidentiel, sur lequel il est possible de faire de sensibles économies et le transport qui, avec le développement économique souhaité et l'évolution du mode de vie ne pourra par contre qu'augmenter.



Graphique 1 : Répartition des consommations énergétiques en France

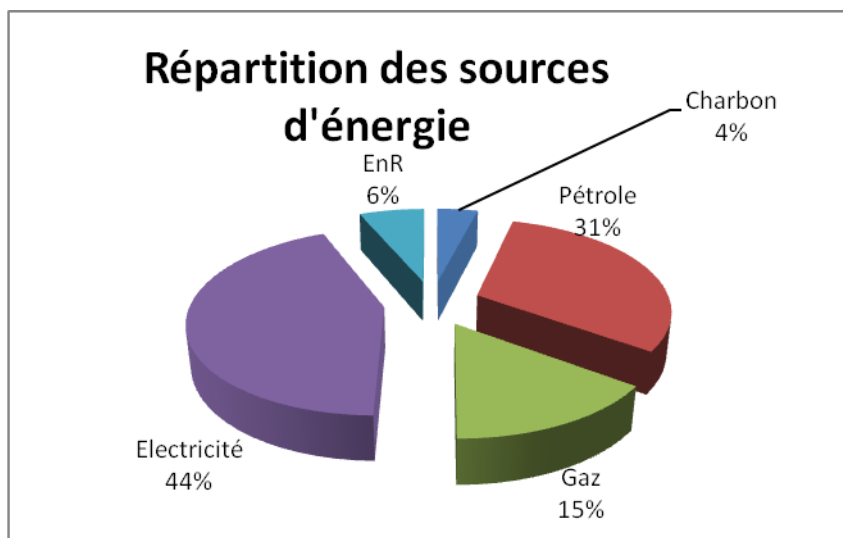
2.2. RÉPARTITION DES DIFFÉRENTES ÉNERGIES CONSOMMÉES

Le graphique 2 ci-après donne la répartition des différentes sources d'énergie consommée en France en 2010.

L'électricité, appelée électricité primaire, provient d'énergies primaires non fossiles c'est-à-dire d'origines nucléaire, hydraulique, éolienne et photovoltaïque¹. L'électricité produite à partir d'une transformation de combustibles fossiles est intégrée dans les autres sources d'énergie (charbon, gaz, pétrole).

¹ Définition EDF et INSEE.

La partie énergie renouvelable (EnR) concerne l'énergie thermique (biomasse, récupération des déchets, biocarburants, géothermie, solaire thermique).



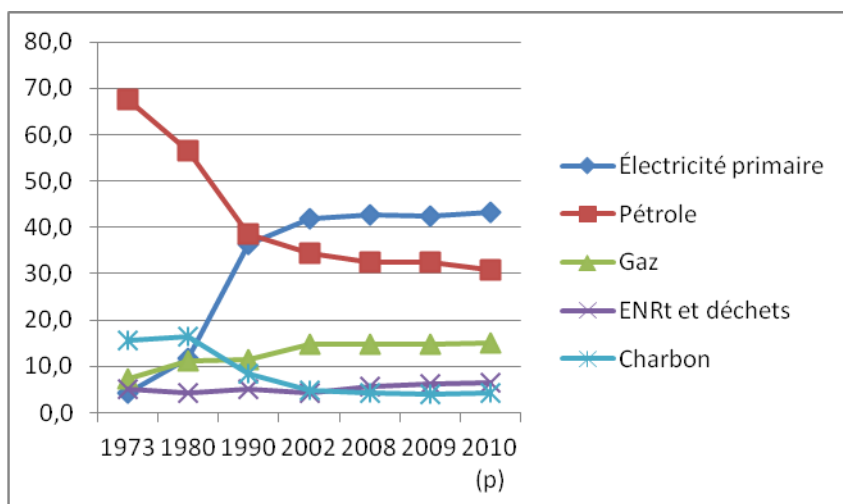
Graphique 2 : Répartition des sources d'énergie en France

2.3. ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION

Le graphique 3 montre, en pourcentage de l'énergie totale, l'évolution de la consommation par source d'énergie depuis le choc pétrolier de 1973.

La forte décroissance de la consommation de pétrole correspond à la montée en puissance de la production d'électricité d'origine nucléaire complétée maintenant par les énergies renouvelables, éolienne et photovoltaïque, ainsi que la mise en valeur énergétique de la biomasse et des déchets.

La consommation française a été de 266 Mtep² en 2010.



Graphique 3 : Evolution de la consommation en France

3. QUEL BESOIN EN ÉNERGIE POUR DEMAIN EN FRANCE ?

Si l'on considère que la France suit l'évolution prévue pour l'Europe OCDE (augmentation de 0,5 % par an), en 2030 le besoin en énergie sera de l'ordre de 290 à 300 Mtep.

² Unités employées dans le texte :

Mtep : Mégatonne équivalent pétrole = million de tonnes équivalent pétrole, 1 tep = 11 700 kWh

MWh : Mégawatt heure = 10³ kWh = mille kWh, **GWh** : gigawatt heure = 10⁹ kWh = million kWh

TWh : Téra watt heure = 10¹² kWh = mille million de kWh

Le tableau 1 donne un comparatif entre la consommation en 2010 et les évolutions prévisibles pour 2030.

Type d'énergie	Charbon	Gaz naturel	Renouvelable non électrique	Pétrole	Electricité primaire	Total
Quantité Mtep 2010	11,4	40,1	17,0	82,2	115,2	266
Répartition % (2010)	4,3	15,1	6,4	30,9	43,3	100
Quantité Mtep 2030	12	47	21	80	136	296
Répartition % (2030)	4	16	7	27	46	100

Tableau 1 : Evolution de la consommation en France entre 2010 et 2030

La répartition entre les différentes sources d'énergie a été établie en prenant comme modèle l'évolution constatée entre 2002 et 2010 (graphique 3) et extrapolée sur les 20 prochaines années³.

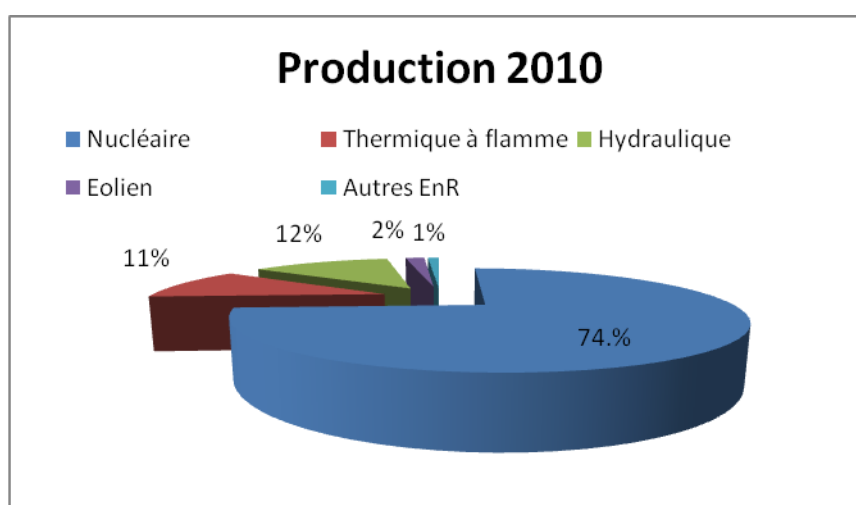
De ce tableau, il ressort qu'en France l'essentiel de l'augmentation de la consommation sera supportée par l'électricité produite par des combustibles non fossiles, l'électricité à base d'énergie fossile, pétrole gaz et charbon, ne venant qu'en appoint si nécessaire. La légère augmentation de la consommation de gaz naturel est essentiellement liée à la montée en puissance des énergies renouvelables intermittentes (éoliennes et photovoltaïques) afin de compléter leur production irrégulière. Ces projections sont faites sur la base des hypothèses actuelles, et sont bien sûr dépendantes des politiques énergétiques qui seront mises en œuvre.

Dans le monde, les projections montrent que l'augmentation de la consommation d'énergie sera imputable pour moitié à la demande d'électricité. La France devrait suivre cette même évolution avec sa politique industrielle basée sur la recherche et les technologies de pointe, le développement des transports électriques, le développement des outils de communications... autant d'éléments consommateurs d'électricité.

4. LA PRODUCTION ÉLECTRIQUE FRANÇAISE ET BESOIN POUR LE FUTUR

En l'absence d'autorisation d'exploitation des gaz de schiste, le seul paramètre autonome sur lequel la France peut agir est la production électrique.

En 2010, cette production a été de 550,3 TWh pour une consommation de 488,1 TWh soit un excédent de 62,2 TWh qui permet de couvrir les différents aléas (production, climat, etc.) et d'alimenter le marché extérieur.



Graphique 4 : Répartition de la production électrique française en 2010

Depuis 2005 la production semble se stabiliser entre 540 et 550 TWh avec actuellement de l'ordre de 15 % d'énergie renouvelable (graphique 4).

³ Le processus évolutif de nos sociétés permet de conforter ce modèle sur les 20 prochaines années.

Le tableau 3 qui complète le graphique 4 donne la répartition des productions pour les années 2005 et 2010 et montre le bon équilibre entre les différentes sources permettant de maintenir un volume de production constant.

Production (TWh)	Nucléaire	Hydraulique	Thermique fossile	Eolien	Autres EnR	Total
2005	430	56	54,8	4,3		545,1
2010	407,9	68	59,4	9,5	5,5	550,3

Tableau 3 : Répartition de production d'électricité

Dans la perspective 2030 le besoin en énergie électrique doit tenir compte de trois paramètres :

- le facteur croissance lié au PIB
- le transfert des usages lorsque l'on passe d'une énergie fossile à une énergie propre (développement des transports électriques par exemple)
- la Maitrise de la Demande en Energie (MDE).

De là on peut faire plusieurs estimations :

- une croissance basée sur une extrapolation de la consommation entre 2002 et 2009 en excluant la crise économique de ces 3 dernières années ; ceci conduit à un besoin de référence de l'ordre de 600 TWh
- une croissance en stagnation et une diminution de la consommation ramenant le besoin à 530TWh
- une forte croissance dans les 20 prochaines années avec une production de 650 TWh
- mais si l'on tient compte de la tendance actuelle et la maîtrise de la demande en énergie, le besoin pourrait être maintenu dans la gamme des 570 à 575 TWh.

Ce sont ces derniers chiffres que nous retiendrons pour la suite de nos investigations

5. COMMENT SATISFAIRE LA DEMANDE D'ÉLECTRICITÉ ?

La France dispose d'une grande variété de moyens de production : nucléaire, hydraulique, renouvelable et fossile.

Comment combiner ces différents moyens pour satisfaire au mieux au besoin en électricité et aux différents impératifs de sécurité, de fiabilité d'approvisionnement, de coût, et d'émission de CO₂ ?

Afin d'avoir des éléments de comparaison nous avons imaginé 3 scénarios :

- scénario 1 : La part du nucléaire dans la production électrique passe à 50 % du besoin
- scénario 2 : La quantité d'énergie produite par le nucléaire est la même qu'en 2010 l'augmentation du besoin étant prise en charge par le renouvelable et le fossile associé
- scénario 3 : La production électrique, à partir d'énergies fossiles émettrices de CO₂, reste identique à celle de 2010.

5.1. HYPOTHÈSES DE SIMULATION DE LA PRODUCTION ÉLECTRIQUE EN 2030

Hypothèse 1 : Compte tenu du caractère irrégulier et aléatoire du photovoltaïque et de l'éolien et afin de répondre au besoin, on supposera que l'appel aux ressources fossiles n'aura qu'un rôle complémentaire.

Il faut être conscient que le facteur de charge⁴ d'une éolienne terrestre est de l'ordre de 20 à 23 %.

Le facteur de charge du photovoltaïque est de l'ordre de 9 à 10 % avec les technologies actuellement industrialisées.

⁴ Le facteur de charge, sur une durée déterminée, est le rapport entre l'énergie effectivement produite et l'énergie qui aurait été produite à puissance nominale. Ces chiffres sont donnés pour une année de fonctionnement.

Hypothèse 2 : La capacité hydraulique de la France est quasiment toute exploitée. Bien que cette production soit également fortement liée aux aléas climatiques on considère que la production hydraulique restera constante sur la durée concernée et égale à 60 TWh valeur moyenne entre 2005 et 2010.

Hypothèse 3 : La part que prendront les différentes énergies renouvelables hors hydraulique est difficile à déterminer, l'éolien étant toutefois le principal contributeur. On définira pour dimensionner facilement le problème un système appelé « éolienne de référence » caractérisant le mix énergétique éolien terrestre et maritime⁵, photovoltaïque etc.

Hypothèse 4 : Caractéristiques de l'éolienne de référence.

La puissance installée d'une éolienne de référence est fixée forfaitairement à 2,5 MW⁶.

Compte tenu du développement de l'éolien maritime et pour simplifier on considèrera pour l'éolien un facteur de charge moyen de 25 %, c'est-à-dire que, pour une production d'énergie renouvelable de 25 MWh, l'énergie fossile devra fournir à la demande 75 MWh (essentiellement des turbines à gaz).

5.2. COMPARAISON DES TROIS SCÉNARIOS

Le tableau 4 ci-dessous permet une comparaison entre les trois scénarios en matière de production nucléaire, d'appel aux énergies fossiles et de moyens à mettre en œuvre pour couvrir les objectifs demandés de 570 TWh électriques en 2030.

Pour ces scénarios on rappelle que les énergies fossiles servent uniquement à compléter la production renouvelable.

En gras dans le tableau les hypothèses de départ de chaque scénario.

Scénarios	% nucléaire	Nucléaire TWh	Hydraulique TWh	Eolien réf. TWh	Fossile complémentaire TWh	Nb de machines	Production CO ₂ MT
1	50	285	60	56	169	10 000	110
2	71	408	60	26	77	4 700	50
3	75	430	60	20	60	3 700	39

Tableau 4 : Comparaison scénarios de référence

Remarque sur le nombre d'éoliennes

Si l'on reprend la proportion entre les éoliennes terrestres et maritimes définie par le Grenelle de l'environnement on aura :

- pour le scénario 1 : 9 500 éoliennes terrestres et 1 000 éoliennes maritimes
- pour le scénario 2 : 4 500 éoliennes terrestres et 500 éoliennes maritimes
- pour le scénario 3 : 3 455 éoliennes terrestres et 365 éoliennes maritimes

Compte tenu du parc existant il sera nécessaire, pour le scénario 3, de ne fournir que 20 TWh supplémentaires. La répartition sera alors fortement conditionnée par le coût d'investissement et le coût d'exploitation.

5.3. ANALYSE DES SIMULATIONS

Scénario 1 : La production du nucléaire est ramenée à 50 % du besoin 2030.

On retrouve, l'ordre de grandeur des objectifs du grenelle de l'environnement traduit en énergie annuelle produite, avec 56 TWh de renouvelable.

⁵ Le photovoltaïque n'a pas été retenu comme moyen de production de masse car sa très faible capacité de production en fait plutôt une énergie complémentaire et pose le problème de la gestion de toutes ces petites sources d'énergie. Cette production est mieux adaptée à une utilisation locale, mais demande une remise en cause du fonctionnement de nos sociétés qui ne peut pas être envisagée à court terme. A noter que les technologies actuelles de fabrication des cellules photovoltaïques sont très énergivores et extrêmement polluantes. La grande majorité des panneaux photovoltaïques est fabriquée en Chine.

⁶ Les objectifs du Grenelle de l'environnement sont 19 GW pour l'éolien terrestre et 6 GW pour l'éolien marine soit un rapport trois en puissance électrique installée. Les facteurs de charge moyens sont respectivement 0,2 et 0,4. En gardant ce même rapport, le facteur de charge de l'éolienne de référence est $(19 \times 0,2 + 6 \times 0,4) / (19 + 6) = 0,248$. La puissance de l'éolienne de référence est $(19 \times 2 + 6 \times 6) / (19 + 6) = 2,5$ MW en prenant une puissance de 2 MW pour le terrestre et 6 MW pour le marine.

Ceci nécessitera plus de 10000 éoliennes⁷ et fera passer l'électricité renouvelable de 15 % actuel à 20 %. Mais il sera nécessaire de faire fortement appel aux énergies fossiles pour palier les aléas de production, ce qui conduira à une forte augmentation de émissions de CO₂ (110 MT pour 39 actuels)⁸. Ceci pose également le problème de l'implantation et l'interconnexion de ce grand nombre de machines sur des sites suffisamment ventés pour qu'elles puissent garder de bonnes performances.

Scénario 2 : La production nucléaire est la même qu'en 2010 ce qui ramène sa part à 71 % du besoin total de 2030 à comparer au 78,8 % réalisés en 2005.

La part de l'électricité renouvelable restant de l'ordre de 15 % mais avec une forte augmentation de la production l'éolienne qui atteindra 26 TWh et prendra à elle seule l'augmentation du besoin électrique de 2030.

Ceci conduira toutefois à une augmentation de la production de CO₂.

Scénario 3 : La volonté de ne pas augmenter la production de CO₂ nécessite de limiter le recours aux énergies fossiles. Ceci conduit à une production nucléaire équivalente à celle de 2005 qui ne correspond toutefois plus qu'à 75 % de l'énergie nécessaire en 2030. La part du renouvelable sera de 14 % et la production de l'éolien de référence passera de 15 à 20TWh soit une augmentation de 33 % par rapport à aujourd'hui.

Dans les scénarios 2 et 3 l'augmentation du besoin énergétique sera essentiellement assurée par les énergies renouvelables et le fossile associé, la capacité nucléaire actuelle étant suffisante pour satisfaire au besoin jusqu'en 2030 **à condition qu'elle soit maintenue.**

5.4. NOTE SUR LE COÛT DE L'ÉOLIEN MARITIME

Le prix de construction des éoliennes maritimes dépend de nombreux paramètres fonction du lieu d'implantation, de la profondeur des fonds marin, de la géologie sous-marine, de la distance à la côte, des environnements marins et aériens etc.

Ce prix est d'autant plus difficile à évaluer que la France n'a pas d'expérience dans ce domaine.

Afin de dimensionner le problème et permettre une comparaison avec le projet EPR en cours de développement on a pris comme référence les objectifs des pouvoirs publics pour la réalisation du parc éolien maritime.

- **Objectif du projet de parcs éoliens maritimes** :
Puissance électrique 3 000 MW (500 à 600 éoliennes)
Coût de projet 10 milliards d'Euros
- **Projet EPR**
Puissance électrique 1 600 MW
Coût du projet réactualisé 8,5 milliard d'Euros

Le tableau 5 ci-après donne un comparatif sur les deux projets.

Projet	Puissance électrique installée	Facteur de charge	Puissance électrique efficace	Rapport de puissance	Prix du projet	Rapport de prix
Eolien	3 000 MW	0,4	1 200 MW	0,82	10 Md €	1,18
EPR	1 600 MW	0,91	1 456 MW		8,5 Md €	

Tableau 5 : Comparaison scénarios éolien et parc EPR

Cette analyse comparative montre que l'éolien maritime aura une production électrique de l'ordre de 20 % plus faible que l'EPR pour coût de construction de 20 % plus cher.

A ce bilan financier vont se rajouter les problèmes liés à l'implantation de six lignes haute tension supplémentaires desservant les six parcs en projet, et la nécessité d'avoir une réserve d'énergie quasi instantanée pour palier les problèmes d'intermittences avec une gestion complexe des phases transitoires.

⁷ Au 1^{er} janvier 2012, le parc éolien était constitué de 3 695 éoliennes pour une puissance installée de 6 756 MW soit une puissance moyenne de 1,8 MW par éolienne.

⁸ Energie complémentaire fournie par des turbines à gaz produisant 650 kg de CO₂ par MWh. Toute autre source d'énergie fossile conduira à une plus forte production de CO₂.

6. CONCLUSION

Le choix énergétique pour l'avenir est un problème complexe car il dépend de nombreux paramètres tant techniques, financiers que politiques auxquels s'ajoutent la sensibilité des populations aux arguments écologiques et la notion de danger.

En France, comme pour l'ensemble des pays européens de l'OCDE, l'augmentation de la consommation énergétique restera globalement modeste sur les vingt prochaines années grâce à la montée en puissance des politiques d'économies d'énergie et l'appel à d'autres sources telles que la biomasse, la géothermie et le solaire thermique.

L'électricité devra assurer une grande part de cette augmentation compte tenu de la politique de recherche et d'innovation souhaitée par la France, le développement des transports propres et l'augmentation naturelle liée à une société de plus en plus technologique.

Les énergies renouvelables devraient en partie couvrir cette augmentation. Mais du fait de la saturation de la capacité hydraulique, le recours à l'éolien et au photovoltaïque nécessite un complément en énergie fossile dans un rapport 1/4, 3/4 pour pallier les aléas de la production.

Un compromis est donc à trouver pour ne pas augmenter outre mesure les émissions de gaz à effet de serre. Une projection de la production électrique en 2030 montre qu'un bon équilibre devrait se trouver à un niveau du nucléaire un peu supérieur à 70 % associé à 15 % de renouvelable, le complément étant assuré par les énergies fossiles.

La capacité du parc nucléaire actuel devrait satisfaire à ces besoins jusqu'en 2030.

Pour l'avenir plus lointain, il faut être conscient que la transition énergétique est une œuvre de très longue haleine qui nécessite, outre des progrès techniques et technologiques, la recherche de concepts énergétiques nouveaux et une remise en cause assez fondamentale du fonctionnement de nos sociétés, ce qui ne peut se faire que sur plusieurs générations.

7. SOURCES

- OCDE** : Organisation de Coopération et de Développement Economique
- EIA** : Energy Information Administration (agence américaine)
- AIE** : Agence Internationale de l'Energie
- INSEE** : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
- SOeS** : Service de l'Observatoire et des Statistiques
- EDF** : Electricité de France
- ERDF** : Electricité Réseau Distribution France
- CEA** : Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energie Alternatives
- EHESS** : Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales
- UFE** : Union Française de l'Electricité
- Connaissance des énergies** : Fiches pédagogiques