

COMPARAISON DES DIFFERENTS MODES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

1. ANALYSE DU PROBLÈME

Malgré la nécessité, pour le monde, de maîtriser sa dépense énergétique, la production d'électricité ne peut que globalement augmenter car, pour de nombreux pays, les équipements sont insuffisants et ne peuvent pas satisfaire aux besoins minimaux des populations.

Pour les pays les plus développés, le mode de vie et les nouvelles technologies sont de plus en plus consommatrices d'électricité que ne compenseront sans doute pas, les économies d'énergie¹.

Citons quelques évolutions particulièrement irréversibles : tous les automatismes et équipements qui entrent dans notre vie de tous les jours, les communications et les moyens informatiques indispensables à la gestion de nos sociétés avancées, les transports « propres » pour lutter contre le réchauffement climatique (trains, tramways, véhicules électriques...).

Pour la France, plus particulièrement, la volonté de relocaliser l'industrie et le développement de nouveaux secteurs accroîtra, sans aucun doute, la consommation électrique, carburant des technologies modernes.

Pour chaque pays les moyens de production vont dépendre de nombreux facteurs :

- ses besoins
- son niveau technologique
- sa situation géographique (énergie solaire, éolienne, hydraulique)
- sa localisation (zones isolées)
- ses ressources propres (charbon, pétrole, gaz, uranium)
- ses possibilités d'approvisionnement externe
- sa situation économique (équipements)
- sa densité de population
- sa politique

Cette fiche fait l'inventaire des moyens de production qui seront analysés suivant cinq critères :

- les caractéristiques principales
- la pollution
- les avantages et inconvénients
- les risques majeurs
- l'évolution envisageable

2. CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DES MOYENS DE PRODUCTION

Cinq paramètres ont été retenus pour caractériser chaque système : la source d'énergie, la puissance fournie, le rendement, la durée de vie et le prix de production.

Puissance fournie : Il est très difficile de comparer des systèmes fondamentalement différents. Afin d'avoir un paramètre comparatif, on définit la puissance en fonction de l'importance de l'installation qui se traduit par l'emprise au sol du dispositif de production exprimée en mégawatt par hectare (MW/ha).

Ce paramètre concerne uniquement l'installation de production et n'intègre pas toutes les infrastructures nécessaires au fonctionnement (mines, réseaux et réserves d'eau pour l'hydraulique, oléoducs, gazoducs, transports, etc.). Ces divers paramètres apparaîtront dans la rubrique « avantages et inconvénients ». Les chiffres donnés dans le tableau ci-dessous résultent de valeurs moyennes et ne peuvent être utilisés qu'à titre comparatif.

¹ La part de l'électricité dans le chauffage n'est que de 11 %

Rendement : Le rendement est le rapport entre l'énergie apportée par une source primaire et l'énergie électrique produite.

Durée de vie : La durée de vie correspond au délai entre la mise en service et le démantèlement de l'installation ou à la fin de vie des organes majeurs tel que prévu dans le dimensionnement.

Prix de production : Les coûts donnés dans le tableau ne représentent que les coûts directs de production et ne prennent pas en compte les coûts externes (impact environnemental lié aux émissions de CO₂ ou aux déchets nucléaires, frais de recherche, frais de construction des gazoducs, prospection, etc.)², ainsi que les coûts liés à la disponibilité (source : étude ExternE de la Commission Européenne).

Moyens de production	Source	Capacité de production (Mw/ha)	Rendement	Durée de vie	Coût de production (€ / kWh)
Energie fossile					
centrale diesel	Gas-oil	18	50%	40 ans	
centrale classique à flamme	Charbon,	60	38%	40 ans	0,037
	Pétrole	60	38%	40 ans	0,06
centrale à turbine à gaz	Méthane	55	55%	40 ans	0,036
Energie nucléaire					
centrale 2ème génération	Uox, mox	80	33%	40 ans +20	0,033
centrale 3ème génération	mox	140	36%	50 à 60 ans	NC
Energie renouvelable					
Energie hydraulique					
centrale au fil de l'eau	Rivière	55	70% à 90%	indéterminé	
centrale de montagne	Lacs et torrents	50	70% à 90%	indéterminé	
centrale marée motrice	Dénivelé des marées	80		indéterminé	
hydrolienne	Courants marins			NC	
Energie éolienne					
terrestre	Energie cinétique du vent	0,7	20%	25 ans	0,061
marine				NC	NC
Energie solaire					
Photovoltaïque	Rayonnement solaire	1	10%	20 ans	0,45
Thermodynamique	Rayonnement IR	2,5		NC	0,05
Energie géothermique					
	Sources chaudes		40%	NC	

Tableau 1

NC = paramètre non connu

Indéterminé = la durée de vie est ici essentiellement fonction des infrastructures (barrage) qui, en général, ont une très longue durée de vie (on peut estimer > 100 ans)

Pour les éoliennes terrestres l'emprise au sol est faible. Toutefois l'emprise spatiale est importante puisque pour une hauteur de mât de 120 m et un diamètre d'hélice de 60 m, un espace de 5 ha est nécessaire à chaque machine pour s'affranchir des problèmes d'écoulement aérodynamique

Les centrales thermiques sont toutes en cours de mise aux normes environnementales. Leur durée de vie est fixée arbitrairement à 40 ans. L'ajustement se fera ultérieurement.

3. POLLUTION

La production de CO₂ est calculée sur un cycle complet intégrant la construction, l'approvisionnement, le fonctionnement et de démantèlement du moyen de production, etc.

² Les coûts externes du gaz, du pétrole et du charbon sont supérieurs à 0,050 Euros par kWh

Les moyens utilisant les énergies fossiles sont de très loin les plus polluants et plus particulièrement le charbon, qui, outre le CO₂, facteur principal du réchauffement climatique, rejette également du NOx et du SO₂ néfastes à la santé.

A noter la valeur assez élevée du photovoltaïque qui est due à la quantité importante d'énergie nécessaire à la fabrication des capteurs au silicium. Cette énergie correspond à au moins 3 ans de fonctionnement du capteur ([voir fiche GASN N° 28](#)).

Moyens de Production	Source	Production de CO2 (kg/kWh)	Autres pollutions
Energie fossile			
centrale diesel	Gas-oil		Particules fines
centrale classique à flamme	Charbon,	900	NOx, SO2,
	Pétrole	700	particules,métaux lourds
centrale à turbine à gaz	Méthane	650	faible
Energie nucléaire			
centrale 2ème génération	U8, mox	6	Déchets radioactifs
centrale 3ème génération	idem	6	Déchets radioactifs
Energie renouvelable			
Energie hydraulique			
<i>centrale au fil de l'eau</i>	Rivière	4	0
<i>centrale de montagne</i>	Lacs et torrents	4	0
<i>centrale marée motrice</i>	Dénivelé de la marée	4	0
<i>hydrolienne</i>	Courants marins	NC	0
Energie éolienne			
<i>terrestre</i>	énergie cinétique du vent	NC	0
<i>marine</i>	énergie cinétique du vent	NC	Traitement antifouling
Energie solaire			
<i>Photovoltaïque</i>	rayonnement solaire	100	
<i>Thermodynamique</i>	rayonnement IR	20	0
Energie géothermique			
	Sources chaudes	NC	0

Tableau 2

Les déchets radioactifs se classent en deux catégories, les matières recyclables et les déchets à longue durée de vie.

En France chaque année 1150 T de combustible usagé sont retirées des centrales. Ce combustible aura permis de fournir une énergie correspondant à 23 MT équivalent pétrole.

Ces résidus sont constitués pour 94% d'uranium (1080 T), 1% de plutonium (11,5 T), ces deux éléments étant recyclables pour fabriquer du combustible MOX et 5% de déchets non recyclables (57,5 T). Ces derniers se répartissent eux-mêmes en produits activés d'une durée de vie inférieure à 30 ans mis en stockage de surface (52,9 T) et en produits à très longue durée de vie mis en stockage profond (4,6 T) ([voir fiche GASN N°3](#)).

4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Le tableau ci-après compare les performances de chaque système en mettant en évidence les points forts et les inconvénients de chacun d'eux tant sur leurs performances que sur leur impact sur l'environnement.

Moyens de production	Avantages	Inconvénients
Energie fossile		
centrale diesel	Souplesse d'utilisation; Bien adapté pour les sites isolés (îles)	
centrale classique à flamme	Grande capacité de production	Inertie de fonctionnement
centrale à turbine à gaz	Souplesse d'utilisation; mise en puissance en 15mn	Grande inertie de fonctionnement; Technique nécessitant un haut niveau technologique
Energie nucléaire		
centrale 2ème génération	Grande capacité de production	Grande inertie de fonctionnement; Technique nécessitant un haut niveau technologique, possibilité de détournement de matières fissiles à des fins terroristes
centrale 3ème génération (EPR)*	Grande capacité de production, pas de détournement matière fissile	Grande inertie de fonctionnement; Technique nécessitant un haut niveau technologique
Energie renouvelable		
Energie hydraulique		
<i>centrale au fil de l'eau</i>	Fonctionnement en continu	Barrage sur les rivières. Evolution climatique pour les grands barrages
<i>centrale de montagne</i>	Souplesse d'utilisation. Fonctionnement à la demande, Stockage de l'électricité	Assèchement des vallées nourricières; Création de grands réservoirs (noyage des vallées, déplacement de population)
<i>centrale marée motrice hydrolienne</i>		Noyage des vallées
Energie éolienne		
<i>terrestre</i>		Production aléatoire; vent entre 40 et 90kmh, production annexe équivalente nécessaire (turbine à gaz). Récupération de l'énergie par un réseau électrique complexe.
<i>marine</i>	Production plus régulière	Privatisation du domaine maritime, fortes contraintes environnementales, maintenance plus complexe
Energie solaire		
<i>Photovoltaïque</i>	sites isolés à faible consommation	Production liée à l'ensoleillement nécessite une production annexe
<i>Thermodynamique</i>		Idem + installation uniquement dans les zones désertiques
Energie géothermique		
		Uniquement en zones volcaniques

Tableau 3

Les moyens de production de « masse », centrales thermiques classiques et nucléaires sont en général peu souples dans leur utilisation. Ils constituent cependant la fourniture de base disponible en permanence et de grande puissance.

Parmi les énergies renouvelables, l'hydraulique présente trois avantages. Etre une production de masse et continue pour les grands barrages et les centrales au fil de l'eau, être une énergie d'ajustement pour passer les pics de consommation, être une façon de « stocker l'électricité » dans les grandes retenues d'eau.

Par contre l'édification des barrages et le captage des eaux entraînent une profonde modification des écosystèmes (appauvrissement de la biodiversité par assèchement des vallées nourricières), évolution du mode de vie des populations qui sont déplacées³ et bien souvent une perte des richesses naturelles et culturelles⁴. Les grandes réserves d'eau ont également des conséquences importantes sur le climat et l'écologie⁵.

³ Barrage des Trois Gorges (Chine) surface 1084 km², réservoir de 39.3 milliards de m³, déplacement de 1.8 million d'habitants.

⁴ Le barrage d'Assouan en Egypte a fait disparaître une énorme richesse archéologique.

⁵ Les alluvions bloquées par le barrage d'Assouan n'enrichissent plus les terres en aval qui font maintenant appel aux engrais chimiques.

L'éolien et le photovoltaïque sont des énergies aléatoires dépendantes du vent ou du soleil.

Pour les sites isolés, fonctionnant en autarcie, il est nécessaire de pouvoir stocker cette énergie pendant les phases productives (batteries).

Lorsque cette production alimente le réseau électrique, il est nécessaire de disposer d'un moyen de remplacement d'une puissance équivalente pour pallier les phases inactives. La rapidité de mise en œuvre de l'hydraulique de montagne et/ou des turbines à gaz sont des compléments indispensables.

5. RISQUES MAJEURS

Les moyens de production de masse, indispensables pour alimenter en permanence les grandes agglomérations, les moyens de transport et l'industrie, présentent tous des risques majeurs.

Tout le monde a en mémoire les accidents nucléaires graves entraînant le rejet de produits radioactifs (iode 131, césium 137 et Strontium 90).

Ces accidents ont entraîné des déplacements de population et la neutralisation d'une zone importante autour du lieu de l'accident pour des périodes plus ou moins longues (zone de 30 km autour de Tchernobyl et 400 000 personnes déplacées, zone de 20 km autour de Fukushima Dai ichi et 80 000 personnes déplacées ([voir fiche GASN N° 46](#))). Les retours se feront en fonction des possibilités de traitement de la radioactivité.

Pour l'hydraulique, le problème est lié au risque de rupture des barrages due, soit à des séismes⁶, soit par des modifications des structures du terrain, provoquées par des infiltrations et la pression de l'eau (rupture du barrage de Malpasset⁷ au dessus de Nice en 1959). Ce problème peut être aggravé lorsque les barrages sont en cascade (Chaîne hydraulique de la vallée de la Dordogne par exemple). Le barrage des Trois Gorges en Chine menace 75 millions d'hommes.

Pour le charbon la situation est tout aussi catastrophique. Officiellement la Chine affiche 6000 morts par an dans ses mines. Mais tous les accidents n'étant pas déclarés, le chiffre avoisinerait les 20 000 victimes auxquelles il faut ajouter 250 000 malades pulmonaires graves.

Au pétrole sont associés les risques de pollution lors de l'exploitation et du transport.

On connaît la pollution générée par l'échouage des grands pétroliers. Mais qu'advierait-il si, lors d'un forage profond une fuite due à la rupture d'une canalisation ne pouvait pas être maîtrisée comme cela a failli se produire dans le golfe du Mexique. Ce serait sans aucun doute une catastrophe écologique sans précédent avec de graves conséquences sur l'équilibre biologique et économique d'un immense secteur.

Si le rejet de CO₂ dans l'atmosphère peut être considéré, dans un premier temps, comme une pollution, la rapidité de l'évolution de l'effet de serre additionnel et du réchauffement climatique peut rapidement conduire à des risques majeurs avec l'apparition de plus en plus fréquente de cataclysmes météorologiques et une pénurie d'eau potable qui entraînera des déplacements de populations vers des terres plus hospitalières.

Les événements en Afrique montrent que, malheureusement, ces déplacements occasionnent guerres et massacres.

⁶ Rupture d'un barrage d'irrigation quelques heures après le séisme de Fukushima. Les conséquences ont été heureusement peu importantes au regard du tsunami (un village emporté)

⁷ La rupture du barrage a provoqué une vague de 40 m de haut qui a tout détruit sur son passage et emporté un quartier de Fréjus (500 morts)

Moyens de production	Risques majeurs (*)
Energie fossile	
centrale diesel	0
centrale classique à flamme	
<i>Charbon</i>	Accidents de mines
<i>Pétrole</i>	pollution lors du transport, rupture des canalisations en forages profonds
centrale à turbine à gaz	incendie et explosion d'un méthanier dans un port
Energie nucléaire	
centrale 2ème génération	Fusion du Cœur, dégagement de produits radioactifs, déplacement de populations,
centrale 3ème génération	contamination de grandes surfaces
Energie renouvelable	
Energie hydraulique	
<i>centrale au fil de l'eau</i>	
<i>centrale de montagne</i>	Rupture de barrage (séisme), Effet domino pour les barrages de vallée en série
<i>centrale marée motrice</i>	Rupture de barrage
<i>hydrolienne</i>	0
Energie éolienne	
<i>terrestre</i>	0
<i>marine</i>	0
Energie solaire	
<i>Photovoltaïque</i>	0
<i>Thermodynamique</i>	0
Energie géothermique	0

Tableau 4

(*) N'ont été retenus que les événements entraînant de grandes catastrophes écologiques ou humaines. Il existe toutefois les risques du type industriels (incendie explosion,...).

6. ÉVOLUTION

Ce dernier tableau résume les axes de recherche en cours ainsi que les projets de nouveaux systèmes de production. Les commentaires associés permettent de mieux expliciter les enjeux et les perspectives des ces travaux.

Captage et séquestration du CO₂

Le captage du CO₂ fait l'objet de nombreuses études ([voir fiche GASN N° 35](#)).

La séquestration s'effectue dans les réservoirs souterrains que constituent d'anciennes exploitations pétrolières ou gazières.

En France un projet est à l'étude sur le site de Lacq dans les Pyrénées Atlantiques. Il a pour but de tester l'étanchéité de ces réservoirs et d'évaluer les performances et le coût, qui est estimé actuellement à 50 € la tonne de CO₂ séquestrée. La quantité stockée restera de toute façon faible par rapport aux quantités produites.

La constitution de grandes réserves forestières pour piéger le CO₂ est sans doute une meilleure solution.

Moyens de production	Projets et recherche
Energie fossile	
centrale diesel	
centrale classique à flamme	stockage du CO ₂ Amélioration des performance des chaudières, rendement et pollution (piégeage du SO ₂ , Nox et des poussières)
centrale à turbine à gaz	
Energie nucléaire	
centrale 4ème génération	Transmutation des déchets hautement radiotoxiques de longue durée de vie
fusion nucléaire	ITER
Energie renouvelable	
Energie hydraulique	
<i>centrale au fil de l'eau</i>	Pas de possibilité d'extension en France
<i>centrale de montagne</i>	
<i>centrale marée motrice</i>	
<i>hydrolienne</i>	Trois sites potentiels en France (Chaussée de sein, Fromveur, Raz de Blanchard)
Energie éolienne	
<i>terrestre</i>	Eolienne carénée, éolienne à effet Magnus
<i>maritime</i>	Projet d'installation d'un parc au large de la cote d'Opale
Energie solaire	
<i>Photovoltaïque</i>	Fonctionnement en IR, utilisation des nanotechnologies
<i>Thermodynamique</i>	Peu de possibilités en France
Energie géothermique	Agrandissement de la centrale de Guadeloupe

Tableau 5

Les éoliennes

Plusieurs concepts sont à l'étude pour pallier l'effet de précession gyroscopique et élargir la plage de fonctionnement limitée par la loi de Beltz ([voir fiche GASN N° 31](#)). Des éoliennes du type Stromlad (éoliennes carénées) sont en cours d'évaluation. Leur plage de fonctionnement permet des vitesses de vent allant de 11 à 193 km/h alors qu'elle n'est que de 40 à 90 km/h pour les éoliennes actuelles⁸. Mais ceci est au détriment de la puissance. Toutefois l'avantage de ces systèmes est d'avoir une production beaucoup plus régulière.

Il existe également des prototypes d'éoliennes basées sur l'effet Magnus qui permettra un rendement double de celui des hélices. Cette technologie pourra également conduire à des petites unités mieux adaptées à des productions locales.

Les hydroliennes

Trois sites sont actuellement prospectés en Bretagne mais les emplacements permettant une production de puissance restent rares en France.

Chaussée de Sein pour une puissance de 1000 MW

Fromveur pour une puissance de 2000 MW

Raz de Blanchard pour une puissance de 3000 MW

Les énergies marines font l'objet actuellement de nombreux projets ([voir fiche GASN N° 44](#)).

Les capteurs photovoltaïques

Actuellement, quatre domaines de recherche se développent autour de cette filière :

- le fonctionnement dans le domaine Infra-Rouge qui permettra d'avoir une production électrique même par temps couvert

⁸ Cette plage correspond au rendement optimal de la machine.

- la fabrication de silicium à bas coût pour diminuer le prix des capteurs
- l'implantation des cellules photoélectriques sur un support souple (film polymère), qui permettra d'épouser de nombreuses formes (carrosserie des automobiles par exemple)
- l'utilisation des nano fils pour réduire les phénomènes d'ombre (rendement 25%)

Le nucléaire

EPR est une forte avancée sur le plan de la sûreté⁹. Forte des enseignements des trois accidents graves¹⁰ recensés jusqu'à ce jour dans la filière nucléaire, celui de Fukushima permettant de confirmer les choix retenus, les technologies et les techniques mises en œuvre vont permettre le maintien des produits radioactifs à l'intérieur de l'enceinte du réacteur en cas d'accident évitant ainsi l'évacuation des populations. A cela se rajoutent de meilleures performances de la machine (fiabilité, rendement etc. [voir fiche GASN N° 13](#)).

La production électrique continue et de puissance est une nécessité pour le développement de nos sociétés. Le nucléaire, non producteur de CO₂, est une voie que l'on ne peut pas ignorer face au réchauffement climatique. Actuellement de nombreux travaux sont en cours sur les surgénérateurs avec six projets qui permettront de pallier la diminution des réserves d'uranium ([voir fiche GASN N° 22](#)).

Ces technologies devraient également permettre d'apporter une réponse au problème de la transmutation des déchets à très longue durée de vie.

On fonde de gros espoirs sur la fusion contrôlée qui mettrait le monde définitivement à l'abri des problèmes d'énergie (projet ITER¹¹) ([voir fiche GASN N°16](#)) sans présenter les risques liés à la fission nucléaire.

La communauté internationale est mobilisée sur ce projet mais les échéances sont encore éloignées avec un prototype industriel vers 2050 et un développement pour le 22^{ème} siècle. Les difficultés techniques sont autant de challenges qui font progresser la technologie mais les coûts et les délais sont autant d'entraves qui rebutent nos sociétés « pressées ».

La biomasse

La biomasse ([voir fiche GASN N°40](#)) est une source importante d'hydrogène, carburant de la pile à combustible. Une des techniques prometteuses et n'émettant pas de CO₂ est la photo fermentation. C'est l'action, activée par la lumière, d'une bactérie (*Rhodobacter capsulatus*) sur des micros algues. Avec des puissances allant de 0,1 W à 500 kW les piles à combustibles peuvent, à l'avenir, avoir un large domaine d'application.

7. CONCLUSION

L'inventaire et l'analyse de la production électrique montrent que nous disposons actuellement d'une grande diversité de moyens qui doivent pouvoir s'adapter aux besoins et satisfaire aux exigences en matière d'écologie et de préservation des ressources.

Le choix dépend de nombreux facteurs spécifiques à chaque pays : le niveau de développement, l'accès aux ressources, la situation géographique et le besoin en énergie qui se traduit en matière de disponibilité et de puissance fournie.

Il existe deux classes de production : les énergies renouvelables et les énergies non renouvelables.

Les énergies non renouvelables ont la capacité de répondre aux deux critères de disponibilité et puissance, cependant elles présentent le défaut d'être polluantes et d'épuiser les ressources naturelles.

Les énergies renouvelables sont en général de faible capacité, d'un fonctionnement aléatoire et sont limitées par les lois de la physique ou tout simplement par les possibilités d'implantation.

Notre pays en particulier ne dispose que de faibles possibilités de développement supplémentaire.

Dans tous les cas, les productions de puissance présentent toutes un risque majeur.

Si le nucléaire est le plus redouté par le grand public en raison du risque d'évacuation de la population sur de vastes étendues, les autres sources d'énergie présentent des risques tout aussi importants.

C'est la destruction de grande ampleur du biotope marin, par la fuite des forages pétroliers sous-marins, c'est le réchauffement climatique accéléré par la production de CO₂ qui ne permettra pas à l'humanité de s'adapter à cette évolution trop rapide ([voir fiche GASN N° 14](#)), c'est le risque de rupture des grands barrages hydroélectriques et les déplacements des populations liés à leurs implantations ...

L'alimentation en énergie électrique reste donc un problème complexe et crucial pour l'humanité. Elle doit faire l'objet d'un équilibre raisonné entre les différentes sources primaires et les moyens de production, en intégrant les paramètres propres à chaque pays et en restant éloignée des positions dogmatiques.

⁹ 4 systèmes de sauvegarde au lieu de 2, enceintes de confinement doublée, mise en place d'un réflecteur lourd et d'un dispositif de récupération du combustible, "recombineur" catalytique d'hydrogène pour éviter l'explosion.

¹⁰ TMI 1979, Tchernobyl 2006, Fukushima 2011

¹¹ International Thermonuclear Experimental Reactor