

# 2015

Avantages et inconvénients des diverses énergies décarbonées dans la lutte contre le changement climatique : quelles sont vos propositions pour les combiner efficacement ?



Nicolas Wattiez  
sauvonsleclimat.org  
01/07/2015

## Introduction

Par définition les énergies décarbonées n'émettent pas de dioxyde de carbone<sup>1</sup>. Cependant, cette définition est inexacte. En effet, toutes les énergies émettent à un moment donné du carbone dans leur cycle (production des éléments nécessaire à l'extraction ou à l'utilisation de l'énergie). En fait le terme décarboné provient du fait qu'aucun CO<sub>2</sub> n'est émis durant la phase de production d'énergie. On retrouve donc dans cette définition l'ensemble des énergies dites renouvelables ainsi que l'énergie nucléaire.

Dans ce dossier nous nous interrogerons sur les avantages et inconvénients des différentes énergies décarbonées dans la lutte contre le réchauffement climatique et aux possibilités d'intégrations pour une utilisation performante.

Nous passerons, dans un premier temps, en revue l'ensemble des énergies décarbonées définies par le gouvernement français<sup>2</sup> à savoir : les biocarburants, la biomasse énergie, l'éolien, les énergies marines renouvelables, la géothermie, l'hydroélectricité, l'énergie photovoltaïque et solaire thermodynamique (l'ensemble des technologies utilisant le soleil) et le nucléaire.

Ensuite nous établirons des propositions pour leur utilisation permettant de lutter contre le réchauffement climatique.

## Présentation de l'ensemble des énergies décarbonées

(Voir bibliographie pour la justification des informations)

### Les biocarburants

Par définition les biocarburants sont *des carburants issus de la biomasse, c'est-à-dire obtenu à partir d'une matière première végétale, animale ou de déchets*<sup>3</sup>. L'utilisation des biocarburants est donc une utilisation de la biomasse. Cependant nous les différencions de l'utilisation de la biomasse pour produire de l'électricité dans ce dossier.

### Principe

Dans les filières classiques les biocarburants sont produits de différentes façons :

Nous avons les biocarburants de 1<sup>ère</sup> génération. Ils utilisent l'huile végétale brute.

Nous avons les carburants de 2<sup>nde</sup> génération qui utilisent la biomasse lignocellulosique pour produire le carburant c'est-à-dire les parties non-alimentaire des plantes.

Enfin nous parlons aujourd'hui de carburants de troisième génération qui est le but de plusieurs projets de recherches. Le principe est l'utilisation de microorganismes comme les algues qui sont capables de produire naturellement des molécules à fortes valeur énergétique pouvant être utilisées pour la synthèse de biocarburants.

---

<sup>1</sup> <http://www.connaissancedesenergies.org/on-peut-parler-indifferemment-d-energie-renouvelable-ou-decarbonee-130313>

<sup>2</sup> Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, rapports sur l'industrie des énergies décarbonées, 2011

<sup>3</sup> Biocarburant.com

## Avantages

- Les biocarburants sont moins chers que l'essence et les combustibles fossiles ;
- Les ressources utilisées sont considérées comme renouvelables ;
- Les biocarburants sont biodégradables ;
- Le carbone résultant de l'utilisation des biocarburants provient de ce que les plantes ont récupéré durant leur vie via photosynthèse. Il n'y a pas ajout dans l'atmosphère de CO<sub>2</sub> supplémentaire ;
- Stimulation économique. La production locale et la non dépendance aux importations de pétrole promet la création d'emplois et de marchés.

## Inconvénients

Le principal inconvénient avec les biocarburants de la 1<sup>ère</sup> génération est la compétition indirecte des ressources agricoles. En effet, l'ensemble des céréales utilisées pour la production des huiles ne sont pas utilisés pour nourrir les populations provoquant une flambée des prix des denrées alimentaires. Cet inconvénient tend à être supprimé avec l'utilisation particulière des plantes (2<sup>nd</sup>e génération) qui évite les conflits d'usage. Cependant la transition vers une production industrielle n'est pas encore atteinte et la question se pose sur le bilan environnemental par rapport aux carburants fossiles.

Nous rencontrons aussi les problèmes suivants :

- Rendement énergétique plus faible que les carburants classiques
- Investissement financier important ;
- Utilisation de grandes quantités d'eau pour la production ;

## Maturité technologique

Au niveau de la maturité technologique, comme nous l'avons mentionné, la production de biocarburants 1<sup>ère</sup> génération est maîtrisée mais son usage porte à caution. Les recherches sur les biocarburants de 2<sup>nd</sup> génération sont suffisamment avancées pour estimer une production industrielle dans les prochaines années. La 3<sup>ème</sup> génération quant à elle n'en est qu'au début des recherches.

Ce tableau issu de l'article publié à Sciences Eaux et territoires<sup>4</sup> résume l'ensemble de la thématique.

Types de biocarburants	Filières	Ressources	Principaux atouts	Principales limites
Première génération	Éthanol	Cultures sucrières, céréales	Technologies matures. Bilans énergie et GES globalement inférieurs à ceux de l'essence et du diesel.	Forte emprise au sol, effet majeur des CAS. Impacts locaux liés à la phase agricole, inexistant dans le cas des filières pétrolières.
	Huiles végétales et EMHV	Cultures oléagineuses		
Deuxième génération	Éthanol cellulosique BTL	Éléments non spécifiques aux résidus ou aux cultures	Bilans énergie/GES et impacts locaux plus réduits que pour la première génération.	Technologies en développement (pilotes de démonstration industrielle), encore coûteuses.
		Résidus forestiers ou de culture	Impacts limités de la mobilisation de résidus. Pas d'emprise au sol.	Potentiel limité de la ressource.
		Cultures dédiées (TCR, herbacés)	Emprise au sol réduite par rapport à la première génération.	Possibilité d'effets négatifs liés au CAS.
Troisième génération	Huiles végétales et EMHV	Micro-algues	Emprise au sol réduite par rapport aux première et deuxième générations, avec possibilité de mobiliser des terres non fertiles. Capacité de capture biologique du CO <sub>2</sub> industriel.	Technologies immatures. Forts besoins énergétiques liés à la production des micro-algues et l'extraction de l'huile.

<sup>4</sup> Benoist, va, de Steene, Broust, Helias, Enjeux environnementaux du développement des biocarburants liquides pour le transport, Sciences Eaux & Territoires, 2012

Cette énergie décarbonnée étant à part par rapport aux autres (pas de production électrique) elle ne sera plus mentionnée pour la suite du dossier. Pour résumer, son utilisation possible dans la lutte contre le réchauffement climatique est liée à son développement qui sera pertinent quand les biocarburants de 2<sup>nd</sup>e génération pourront être produits au stade industriel car ils offrent une sérieuse alternative à l'utilisation de pétrole sans apporter de concurrence avec des besoins fondamentaux comme la production de nourriture.

## La biomasse énergie

La biomasse au niveau énergétique désigne *l'ensemble des matières organiques d'origine végétale (algues incluses), animale ou fongique (champignons) pouvant devenir source d'énergie par combustion (ex : bois énergie), après méthanisation (biogaz) ou après de nouvelles transformations chimiques*<sup>5</sup>.

### Principe

*La combustion de matières organiques végétales ou animales permet de dégager un pouvoir calorifique utilisé pour produire de l'électricité ou de la chaleur*<sup>6</sup>. La méthanisation est une technologie basée sur la dégradation par des micro-organismes de la matière organique, en conditions contrôlées et en l'absence d'oxygène<sup>7</sup>. Cela permet la production de biogaz.

On récupère donc la chaleur qui sera directement réinjecté ou transformé en électricité.

### Maturité technologique

Technologie parfaitement maîtrisée. Les recherches se situent sur les sujets suivants <sup>8</sup> (citation de l'IRSTA):

- *"caractérisation des déchets et prétraitement*
- *développement et optimisation des procédés de méthanisation*
- *valorisation des digestats, résidus solides ou liquides issus du procédé de méthanisation et extraction/récupération des nutriments (azote et phosphore)*
- *optimisation de l'insertion territoriale de la méthanisation (identification et cartographie des ressources disponibles sur le territoire, analyse systémique des territoires, ...)*
- *identification et la cartographie des ressources disponibles sur le territoire*
- *mesure des impacts environnementaux des filières de méthanisation et évaluation des performances environnementales"*

## L'éolien

### Principe

*L'énergie éolienne est l'énergie du vent dont la force motrice est utilisée dans le déplacement de voiliers et autres véhicules ou transformée au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou dans un moulin à vent en une énergie diversement utilisable. C'est une des formes d'énergie renouvelable*<sup>9</sup>.

---

<sup>5</sup> Biomasse (énergie), Wikipédia

<sup>6</sup> Biomasse, la deuxième source d'énergie renouvelable au monde, edf.fr

<sup>7</sup> Ademe, la méthanisation, fiche technique, 2015

<sup>8</sup> Irstea, la recherche sur le terrain de la méthanisation, 2015

<sup>9</sup> Energie éolienne, Wikipédia

## Maturité technologique

Les recherches dans l'éolien s'effectuent à niveau du rendement ou de la forme et sur le développement de l'éolien en mer.

## Les énergies marines renouvelable

### Principe

Utiliser l'énergie marine (les courants et la marée) pour produire de l'électricité. Elles incluent<sup>10</sup> :

- l'énergie marémotrice, due aux mouvements de flux et de reflux des marées
- l'énergie hydrolienne, exploitant les courants marins
- l'énergie houlomotrice, produite par le mouvement des vagues
- l'énergie thermique des mers, exploitant les gradients de température entre les eaux de surface et les eaux profondes
- l'énergie osmotique, basée sur les différences de salinité des eaux douces et salées
- l'éolien off-shore, éolien situé en mer sur des plateformes ancrées ou flottantes.
- l'énergie de la biomasse marine

### Maturité technologique

Cette technologie est très récente. Elle est au cœur de nombreux projets de recherches.

## La géothermie

### Principe

Exploitation de la chaleur stockée dans les sous-sols de la terre. Permet de produire de l'électricité ou d'utiliser la chaleur.

### Maturité technologique

Technologie maîtrisée mais développement faible.

## L'hydroélectricité

### Principe

*L'énergie hydroélectrique, ou hydroélectricité, est une énergie électrique renouvelable obtenue par conversion de l'énergie hydraulique<sup>11</sup>.*

### Maturité technologique

Technologie parfaitement maîtrisée

## Photovoltaïque solaire et solaire thermodynamique

### Principe

Récupérer l'énergie du soleil (rayonnement solaire pour photovoltaïque, chaleur pour solaire thermodynamique) pour la transformer en électricité ou chaleur.

---

<sup>10</sup> Energies marines, Wikipédia

<sup>11</sup> Energie hydroélectrique, Wikipédia

## Maturité technologique

Les recherches sur cette technologie s'effectuent sur les rendements des panneaux, le stockage de l'énergie, la diminution des coûts.

## Le nucléaire

### Principe

De l'électricité est produite à partir de la chaleur dégagée lors des réactions de fissions nucléaires.

### Maturité technologique

Technologie mature au niveau de la fission. Les pistes de recherche concernent la fusion nucléaire, la réutilisation des déchets dans le cycle de combustion (Mox), l'augmentation du rendement.

Les différents avantages et inconvénients de chaque type de production d'énergie est résumé dans l'annexe 1.

## Propositions d'utilisation des énergies décarbonées

(Remarque : l'utilisation des biocarburants a déjà été développée.)

### Intégration des énergies décarbonées dans le réseau électrique (excepté pour le nucléaire)

Les deux problèmes majeurs relatifs à l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique sont l'intermittence des énergies et la dépendance du lieu qui conduit à ne décentraliser de la production électrique (milieux ensoleillé pour le photovoltaïque, milieu marin pour les énergies marines...). En effet, le réseau électrique conventionnel doit s'adapter pour incorporer des systèmes d'exploitation avec les énergies renouvelables. De par leur intermittence, il faut absolument coupler les énergies renouvelables avec des productions d'énergie plus classique. Devant être capable de répondre aux besoins des consommateurs à tout instant, il faut assurer une distribution de l'énergie constante. Donc si un système éolien, par exemple, s'arrête de fonctionner (trop ou pas assez de vents), une centrale à fioul est prête à tout instant à prendre le relais. Il est estimé que plus on connecte de sources d'électricité renouvelables, plus ce problème diminue. Les productions étant en général complémentaires nous pouvons imaginer que quand il n'y a pas de soleil il y a du vent. De plus s'il existe un réseau électrique à grande échelle nous pouvons engager un phénomène d'interconnexions permettant de pallier à des manques locaux. Il y a par exemple l'interconnexion entre le réseau hydroélectrique norvégien et le parc éolien du nord de l'Allemagne qui est en route<sup>12</sup>. Mais cela suppose une bonne entente entre les pays concernés.

Dans notre situation, la combinaison des énergies renouvelable est donc possible et a déjà été amorcé dans certains pays. L'idée est donc de profiter de chaque spécificité régionale (mer, vent, soleil) et de créer un vaste réseau de communication électrique pour que chaque ressource

---

<sup>12</sup> Heuillard, Transition énergétique : comment stocker l'électricité renouvelable, dd magazine, 2014

contrebalance les problèmes d'intermittence. Cependant, on estime que quand le pourcentage d'énergie renouvelable dans le réseau électrique dépasse les 30% (taux de pénétration), celui-ci rencontre des problèmes de gestion et de déséquilibre. Si l'on veut augmenter le taux de pénétration des énergies renouvelables il faut que le système électrique évolue en passant d'un système qui offre de l'énergie en fonction de la demande à un système où la demande est gérée de façon active, avec une responsabilisation des consommateurs.

## Création d'un réseau électrique réactif : le smart grid

Pour résoudre le problème de l'intermittence des énergies, l'interconnexion n'est pas suffisante. Nous avons besoin de créer un réseau réactif capable d'anticiper les variations de demandes en énergies par rapport aux productions d'électricité. Ce principe est connu sous l'appellation smart grid<sup>13</sup>. Le smart grid consiste à développer *"un réseau de distribution d'électricité intelligent qui utilise des technologies informatiques de manière à optimiser la production, la distribution, la consommation et qui a pour objectif d'optimiser l'ensemble des mailles du réseau d'électricité qui va de tous les producteurs à tous les consommateurs afin d'améliorer l'efficacité énergétique de l'ensemble"*. L'historique de la mise en place du smart grid et donc de la mise en place des énergies renouvelables dans le réseau électrique est décrit en plusieurs étapes détaillé par le site smartgrids-cre.fr<sup>14</sup>. A savoir :

- Un changement de la donne énergétique. Diminution des ressources énergétiques fossiles, augmentation des énergies renouvelables, redéfinition du mix énergétique ;
- Evolution du contexte réglementaire. Protocoles et conventions internationaux fixant des objectifs "verts" pour les pays ;
- Raccordement des énergies renouvelables au réseau ;
- Résolution des défis des énergies renouvelables (intermittences, localisation des sites de production, fonctionnement bidirectionnel du réseau électrique) ;
- Développement de programmes informatiques et d'outils de gestion des réseaux permettant une réactivité de plus en plus poussée.

Pour parvenir à cette réactivité il convient de :

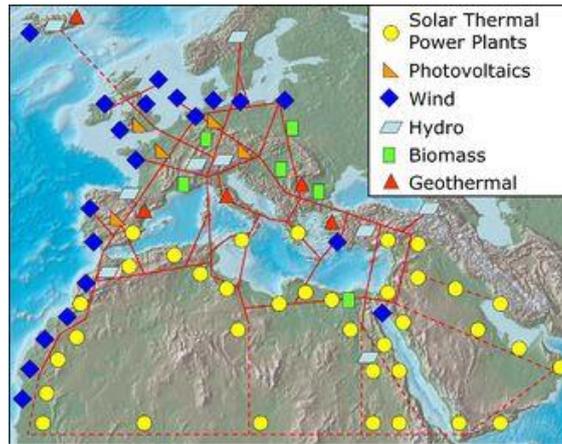
- Développer l'observabilité. C'est-à-dire être capable de surveiller le réseau à tout moment pour anticiper les incidents et faciliter la prise de décisions ;
- Développer des outils de prévision de l'équilibre production/consommation, de la météorologie ;
- Développer des fonctions d'automatisation ;
- En agrégeant les productions décentralisées à travers une centrale virtuelle. Plusieurs entités sont réunis pour créer une production d'électricité fictive ;
- Développer la gestion de la demande ;
- Développer des infrastructures de communication et de gestion des données.

Ainsi, si les smart-grid sont suffisamment développés nous pouvons espérer des réseaux électriques de ce style (source Wikipédia) :

---

<sup>13</sup> Wikipédia : smart grid

<sup>14</sup> Les étapes de l'intégration des EnR aux réseaux électriques



Pour résumer, nous pouvons affirmer que la mise en place d'un réseau intelligent demande le développement de l'électronique, l'informatique et la communication intégré au réseau électrique traditionnel déjà existant. Le tableau suivant montre les évolutions attendues pour passer du réseau actuel au réseau intelligent du futur<sup>15</sup>.

Caractéristiques des réseaux électriques actuels	Caractéristiques des réseaux électriques intelligents
Analogique	Numérique
Unidirectionnel	Bidirectionnel
Production centralisée	Production décentralisée
Communicant sur une partie des réseaux	Communicant sur l'ensemble des réseaux
Gestion de l'équilibre du système électrique par l'offre/ production	Gestion de l'équilibre du système électrique par la demande/consommation
Consommateur	Consom'acteur

## Stockage de l'énergie

Le développement du smart-grid passe forcément par l'utilisation d'unités de stockage de l'énergie. L'idée est de stocker l'électricité produit en excès lors des pics (par exemple à midi quand les panneaux photovoltaïques produisent au maximum de leur capacité) pour la redistribuer lors des creux (la nuit pour le photovoltaïque). Cependant, cette solution est plus facile à écrire qu'à mettre en pratique. En effet, le stockage de l'énergie est l'une des problématiques de ce siècle. Devant le manque de sécurité énergétique, les experts prévoient l'apparition d'une crise mondiale vers 2050<sup>16</sup>. C'est pourquoi le développement des énergies décarbonées et des systèmes de stockage d'énergie est si important pour l'avenir de nos sociétés. Ainsi le développement des technologies de stockage permettra le déploiement à grande échelle des énergies décarbonées tout en apportant des

<sup>15</sup> Smartgrids-cre.fr, Définition des Smart grids

<sup>16</sup> Houtart, les crises énergétiques et climatiques, CETRI, 2008

réponses centralisées ou décentralisées au niveau des contraintes locales ou globales selon le cas de figure.

L'annexe 2 présente un bilan des différentes techniques de stockage d'énergie existantes avec leur durée d'efficacité et l'annexe 3 présente leur maturité technologique et compare leur efficacité. Ces deux annexes montrent le besoin de développer les différentes technologies existantes en fonction des spécificités territoriales et du mode de stockage recherché (par exemple le stockage de l'énergie par la chaleur avant reconversion électrique présente énormément de possibilités). Cependant, il convient dès aujourd'hui de fournir des efforts de R&D dans les différentes méthodes de stockage afin d'obtenir une maturité technologique le plus rapidement possible car le stockage d'énergie sera la condition sine qua non à l'intégration de moyens de productions intermittents (énergies décarbonées) au réseau électrique. On peut néanmoins noter l'émergence d'innovations très intéressantes dans le domaine comme le développement d'une technologie de stockage de l'hydrogène par "galettes" promettant de révolutionner la filière<sup>17</sup>.

## Le rôle indispensable de la filière nucléaire

Le développement d'un réseau électrique centré sur les énergies propres rencontre aujourd'hui une problématique de taille : le très faible pourcentage de ces énergies dans la cartographie énergétique mondiale. En effet, comme nous pouvons le constater dans l'annexe 4, le pétrole est le mode de production d'énergie majoritaire, suivi de près par le charbon. Les énergies carbonées dominent la production mondiale de par leur avantage économique, leur maturité technologique et la constance de l'énergie produite. Si l'on veut combiner les énergies décarbonées pour réaliser un mix énergétique à majorité renouvelable, nous ne pouvons pas arrêter du jour au lendemain l'utilisation des énergies fossiles qui cumulées représentent plus de 80% de la production énergétique mondiale. Il faut donc trouver une source d'énergie propre capable de remplir ce fossé énergétique le temps que les filières dites "vertes" puissent être suffisamment présentes pour être indépendantes. La source d'énergie désignée est ainsi la filière nucléaire. Cette énergie décarbonée présente l'avantage d'être propre, maîtrisée, donnant un bon rendement de production et économiquement intéressante. Elle est capable d'assurer la production de très grandes quantités d'énergie pendant encore plusieurs siècles de par l'utilisation de l'uranium, du recyclage de ses déchets (MOx) et de l'utilisation de plutonium et de thorium comme combustibles de substitution.

Bien que les recherches soient ambitieuses dans le domaine du nucléaire, si nous suivons la politique d'utilisation des énergies décarbonées comme élément central de notre futur réseau électrique, nous devrions parvenir au développement massif des énergies renouvelables avant de parvenir à la maîtrise de la fusion nucléaire, objet principal des recherches dans le secteur. Néanmoins, la filière nucléaire est l'alternative la plus sérieuse et prometteuse pour remplacer actuellement l'ensemble des énergies carbonées, le temps que l'ensemble des éléments indispensables à la mise en place d'un réseau électrique centré sur les énergies renouvelables soient atteints. Car s'il est estimé que nous pouvons parvenir vers 2050 à atteindre un mix énergétique 100% renouvelable (rapport AEDEME), les prévisions partent du postulat que des projets de recherches mentionnés dans les paragraphes précédents aboutissent. Ainsi, dans l'attente que les hypothèses deviennent réalité, le nucléaire est la réalité du présent qui permettra de préparer le futur.

---

<sup>17</sup> <http://www.mcphy.com/fr/produits/stockage-hydrogene-solide/>

## Conclusion

Pour résumer l'ensemble des informations présentées dans ce mémoire, je citerai le rapport de l'ADEME qui avait pour objectif de construire un mix électrique 100% renouvelable qui puisse satisfaire la consommation projetée à l'horizon 2050<sup>18</sup>. L'intégration des différentes énergies renouvelables dans le réseau électrique français jusqu'à un remplacement progressif des énergies carbonées est un futur tangible et sérieusement étudié par les organismes de recherche et les gouvernements. Cependant l'atteinte de cette réalité n'est possible qu'avec la combinaison des éléments suivants :

- Une prise en compte des spécificités territoriales pour le développement des énergies renouvelables pertinente ;
- Le développement d'un réseau électrique interconnecté et décentralisé permettant à chaque type de production d'énergie de pallier aux limites de production de leurs homologues ;
- Le développement d'un réseau intelligent via l'utilisation de l'informatique et de l'électronique pour passer à la création d'une distribution électrique nouvelle génération (smart grid) ;
- Une avancée significative des technologies de stockage de l'énergie, condition indispensable à la mise en place des éléments précédents et ainsi dépasser la limite des 30% de taux de pénétration des énergies intermittentes ;
- L'utilisation de l'énergie nucléaire afin de remplacer sur le court et moyen terme les productions d'énergie carbonée avant que le développement des énergies renouvelables soient suffisamment avancées.

---

<sup>18</sup> Ademe, Vers un mix électrique 100% renouvelable en 2050, rapport final, 2015

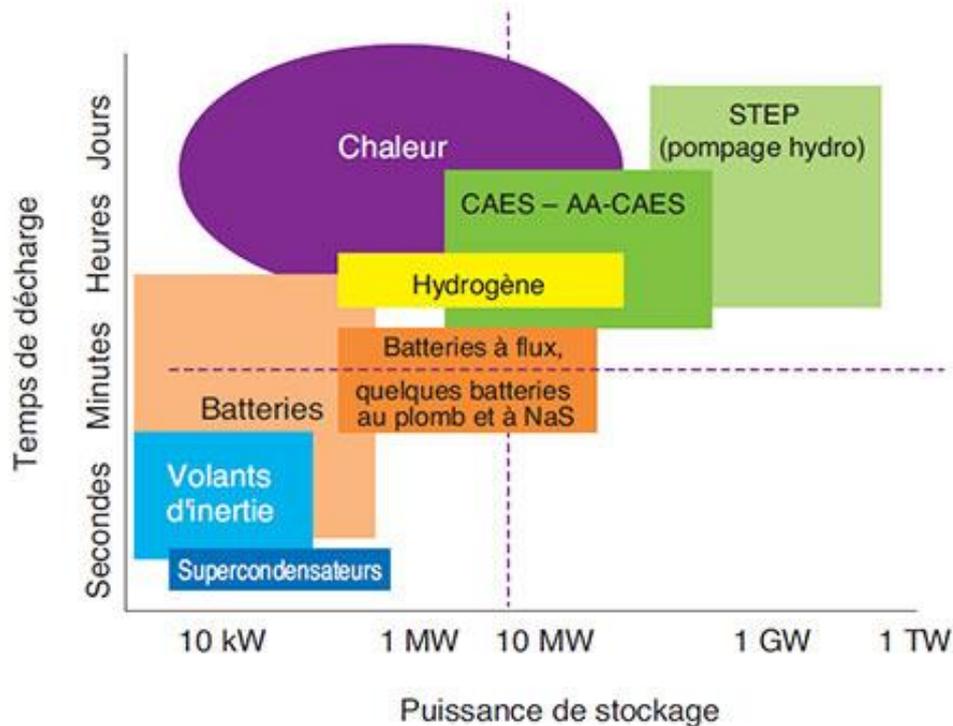
# Annexe 1 : Comparaison des différents modes de production d'énergie à partir de sources décarbonées

Energie	Avantages	Inconvénients
La biomasse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Des modes de valorisation variés (chaleur, électricité grâce à la cogénération, carburant pour véhicules avec le biogaz, injection du biogaz épuré dans le réseau de gaz naturel)</li> <li>• Un captage du CO<sub>2</sub></li> <li>• Biodégradable.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissions possible de sulfure d'hydrogène</li> <li>• Investissement lourd qui nécessite une valorisation de la chaleur en parallèle pour être intéressant économiquement</li> <li>• Apport limité car le recours massif à la biomasse provoquerait des soucis de déforestation</li> <li>• Rendement énergétique faible</li> </ul>
L'éolien	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energie propre et renouvelable (pas de production de déchets ni d'utilisation de carburants, ni de dégradations du milieu)</li> <li>• Capable de fournir en électricité des sites isolés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement dépendant du vent</li> <li>• Energie intermittente</li> <li>• Etape de fabrication polluante utilisant des lanthanides</li> </ul>
Les énergies marines renouvelables	<ul style="list-style-type: none"> <li>• énergie propre et renouvelable</li> <li>• bon rendement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• énergie diffuse et intermittente</li> <li>• nécessite un fort investissement</li> <li>• sites exploitables limités</li> </ul>
La géothermie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energie propre et renouvelable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risque de surexploitation</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Théoriquement inépuisable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concurrence entre l'eau pompée pour la chaleur et l'eau pompée pour elle-même</li> <li>• Dépend d'un point chaud</li> </ul>
L'hydroélectricité	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energie propre</li> <li>• Fournit de forte puissance</li> <li>• Facilement stockable</li> <li>• Fort potentiel d'exploitation.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Déplacement de population lors de la fabrication du barrage</li> <li>• Déformation du paysage et impact sur la biodiversité locale</li> <li>• Risque de rupture de barrage</li> </ul>
Photovoltaïque et solaire thermodynamique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energie propre et renouvelable</li> <li>• Permet d'électrifier des sites isolés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energie chère</li> <li>• Energie intermittente</li> <li>• Dépend du climat</li> </ul>
Le nucléaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bon rendement</li> <li>• Ne rejette pas de CO<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gestion des déchets nucléaires</li> <li>• Méfiance de la population</li> <li>• Risque omniprésent d'accidents grave (Fukushima)</li> </ul>

# Annexe 2 : Présentation des différentes énergies de stockage

Les différentes technologies de stockage en fonction de leur puissance et du temps de décharge (autonomie)



Source : IFPEN d'après diverses sources

- **stockage par pompage/turbinage.** Principe de fonctionnement : pour stocker l'énergie, de l'eau est pompée d'un réservoir à l'autre. Lorsque la demande est forte, l'eau est turbinée pour produire de l'électricité :
  - \_ avantages :
    - technologie mature et bien développée,
    - haute capacité de puissance.
  - \_ inconvénients :
    - technologie encombrante et qui demandent beaucoup d'eau,
- **stockage par air comprimé.** Principe de fonctionnement : de l'électricité est utilisée pour comprimer de l'air et le stocker dans un réservoir. Pour produire de l'électricité, l'air est libéré en produisant un travail mécanique puis transformé d'énergie cinétique à énergie électrique :
  - \_ avantages :
    - puissance et capacité plus importantes que par pompage/turbinage d'eau,
    - bas temps de réponse.

- \_ inconvénients :
    - faible rendement suite à l'échauffement du gaz,
    - besoin de turbines fonctionnant à très haute pression.
  
- **stockage par volant d'inertie.** Principe de fonctionnement : pour stocker l'électricité, du torque est appliqué au volant, en augmentant la vitesse angulaire ( $E_k = (1/2) * I * \omega^2$ ). Pour fournir de l'énergie, le volant applique du torque à une charge mécanique (une turbine) en générant de l'électricité :
  - \_ avantages :
    - système pas affecté par l'environnement,
    - durée de vie indéfinie (potentiellement)
  
- **stockage par méthode électrochimique.** Principe de fonctionnement : les deux électrodes sont mises en contact avec l'électrolyte et sont séparées par une barrière, qui permet que les électrons passent par un certain chemin et produisent du courant électrique. Pour charger la batterie, l'électricité est utilisée pour faire une électrolyse et stocker chimiquement l'énergie. Il y a plusieurs types de batteries faites avec des différents matériaux :
  - \_ avantages :
    - temps de réponse presque instantané,
    - technologie mature avec des amples applications, selon la technologie.
  - \_ inconvénients :
    - besoin d'un système de gestion de batteries,
    - seulement certaines technologies sont appropriées pour les coupler avec des installations d'énergie renouvelable.
  
- **stockage par hydrogène.** Principe de fonctionnement : l'eau est séparée en hydrogène et oxygène par biais de l'électrolyse. L'hydrogène est stockée dans un réservoir jusqu'à sa utilisation. Pour produire de l'électricité, il est injecté dans la pile à combustible où il se dissocie ( $2H_2 = 4H^+ + 4e^-$ ). L'anode, qui est une membrane perméable, fait passer les électrons par un circuit extérieur, provoquant un courant électrique :
  - \_ avantages :
    - très haute densité d'énergie massique,
    - technologie flexible pour différents niveaux d'énergie et de puissance.
  - \_ inconvénients :
    - faible rendement (compression est très énergivore),
    - faible densité d'énergie volumétrique (besoin de grands réservoirs d'hydrogène).

# Annexe 3 : Niveau de maturité technologique des différents moyens de stockage d'électricité et comparaison des performances

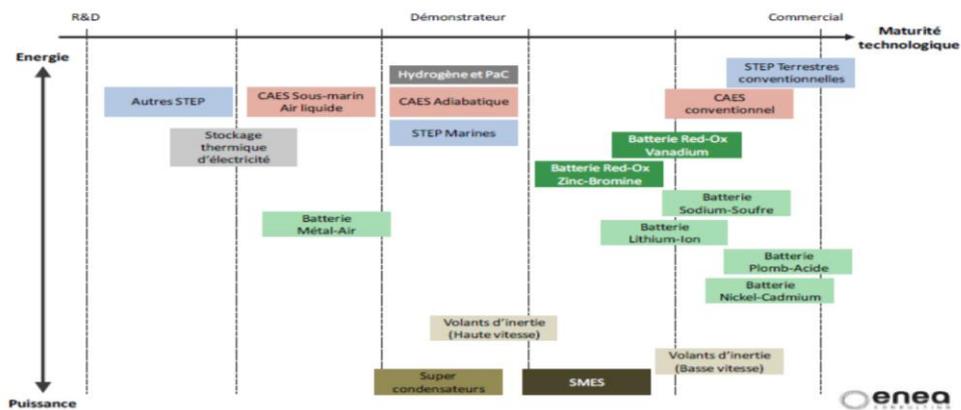


Figure 4 : Niveau de maturité technologique des différents moyens de stockage d'électricité

Typologie des moyens de stockage d'électricité

Stockage gravitaire	Stockage chimique	Stockage inerte
Stockage à air comprimé	Stockage électrochimique	Stockage électrostatique
Stockage thermique	Stockage électrochimique à circulation	Stockage électromagnétique

\* DoE : Department of Energy

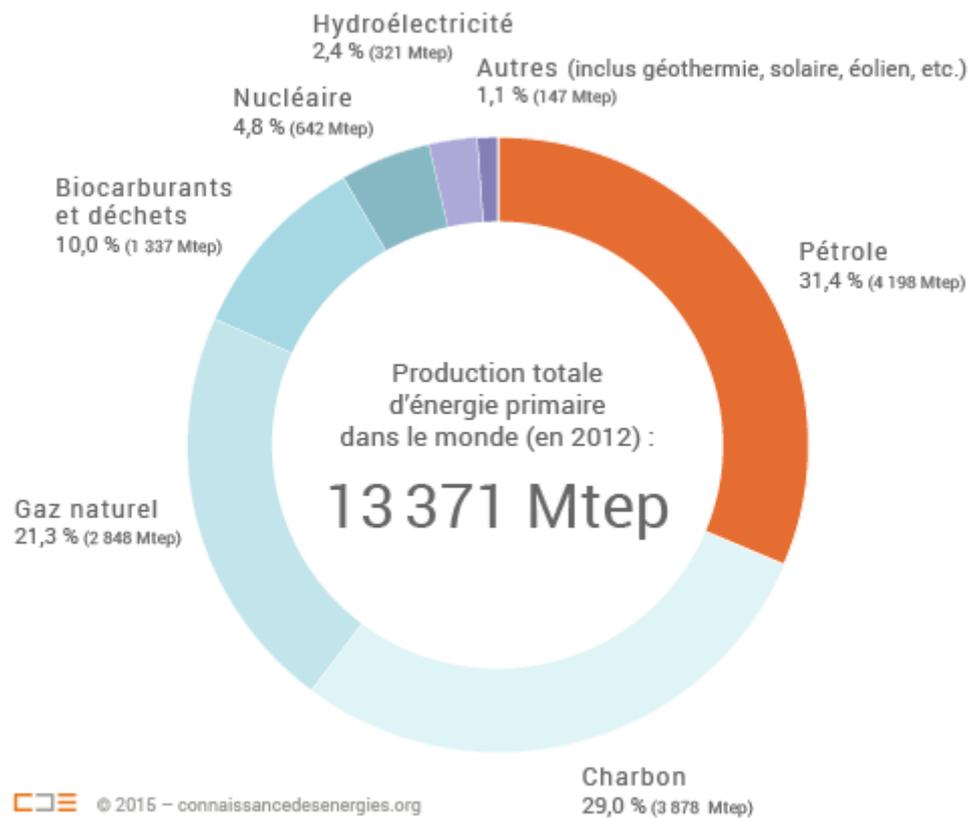
\* NEDO : New Energy and Industrial Technology Development Organization

ene consulting	Capacité disponible	Gamme de puissance	Temps de réaction	Efficacité	Durée de vie	CAPEX puissance (€/kW)	CAPEX énergie (€/kWh)
STEP	1 – 100 GWh	100 MW – 1 GW	s - min	70 – 85 %	> 40 ans	500 – 1 500	70 – 150
CAES	10 MWh – 10 GWh	10 – 300 MW	min	50 % (1 <sup>ère</sup> gén.) 70 % (AA-CAES)	> 30 ans	400 – 1 200	50 – 150
Hydrogène et Pile à Combustible	10 kWh – 10 GWh	1 kW – 10 MW	s - min	25 – 35 %	5 – 10 ans	6 000	< 500
Batteries Sodium-Soufre	< 100 MWh	< 10 MW	ms	75 – 85 %	2 000 – 5 000 cycles	500 – 1 500	150 – 500
Batteries Lithium-Ion	< 10 MWh	< 10 MW	ms	85 – 95 %	2 000 – 10 000 cycles	1 000 – 3 000	300 – 1 200
Batteries Red-Ox Flow	< 100 MWh	< 10 MW	ms	65 – 80 %	2 000 – 12 000 cycles	500 – 2 300	100 – 400
Volants d'inertie	5 – 10 kWh	1 – 20 MW	ms	> 90 %	100 000 cycles	500 – 2 000	2 000 – 8 000
SMES	1 – 10 kWh	10 kW – 5 MW	ms	> 90 %	20 – 30 ans	300	> 10 000
Super condensateurs	1 – 5 kWh	10 kW – 5 MW	ms	90 – 95 %	500 000 cycles	100 – 500	10 000 – 20 000

Figure 6 : Comparaison de différentes technologies de stockage (liste non exhaustive). Les valeurs présentées sont des ordres de grandeur donnés à titre indicatif.

Source : enea consulting, Facts and Figures: Le stockage d'énergie- enjeux, solutions techniques et opportunités de valorisation, 2012

## Annexe 4 : répartition des productions d'énergie mondiale en fonction de leur origine



Source : connaissance-des-energies.org, Production d'énergie dans le monde, 2014

# Annexe 5 : bibliographie

Energie-renouvelables.fr : "les avantages et les inconvénients des différentes énergies renouvelables."

## Les biocarburants

Grégory Launay, Qu'est-ce qu'un biocarburant ?, gnesg.com, 2010

Cea.fr, L'essentiel sur... les biocarburants, 2014

culturesciences.chimie.ens.fr, Les biocarburants : de la 1<sup>ère</sup> à la 3<sup>ème</sup> génération, 2012

<http://www.energie-online.fr/schemas/biomasse/biocarburants/biocarburant.swf>

ifp énergies nouvelles, Les biocarburants de 2<sup>nde</sup> génération proche de l'industrialisation, juin 2015

Le biocarburant, energierenouvelables.fr

## La biomasse

<http://energie-biomass.e-monsite.com/>

## L'éolien

Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne en 2015, les-énergies-renouvelables.eu

Areva.com, Eolien en mer : GDF SUEZ, EDP renouvelable, NEOEN Marine et AREVA s'engagent auprès des acteurs locaux, 2014

## Les énergies marines renouvelables

[http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Energies\\_marines#Inconvenient](http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Energies_marines#Inconvenient)

[http://www.bretagne-peches.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=137&Itemid=86](http://www.bretagne-peches.org/index.php?option=com_content&view=article&id=137&Itemid=86)

## Géothermie

Comment marche la géothermie, mtaterre.fr

## Hydraulique

Avantages et inconvénients de l'énergie hydroélectrique, energiededemain.e-monsite.com

## Energie solaire

Wikipédia : centrale solaire thermodynamique, énergie solaire photovoltaïque, énergie solaire thermique

CEA, domestiquer l'énergie solaire, 2012

## Nucléaire

Avantages et inconvénients de l'énergie nucléaire, <http://energie-nucleaire.net>

Avantages et inconvénients de l'énergie nucléaire, [energiesdemain.e-monsite.com](http://energiesdemain.e-monsite.com)

Site du CEA

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Smart\\_grid](https://fr.wikipedia.org/wiki/Smart_grid)

<http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=etapes-integration-enr>

## Stockage de l'énergie

Jean –Fabrice Bertrand, Les technologies actuelles de stockage et leur état de maturité, ifp énergies nouvelles

enea consulting, Facts and Figures: Le stockage d'énergie- enjeux, solutions techniques et opportunités de valorisation, 2012

## Nucléaire comme alternative indispensable

Source : [connaissancedesenergies.org](http://connaissancedesenergies.org), Production d'énergie dans le monde, 2014

CEA, l'essentiel sur... une filière nucléaire au thorium, 2014

[Planete-energies.com](http://Planete-energies.com), La fusion nucléaire : une maîtrise encore incertaine, 2015

## Rapport de l'ADEME

Rémy Prud'homme, Rapport de l'Ademe sur les énergies renouvelables : les obstacles à un mix électrique 100% renouvelable, [Atlantico.fr](http://Atlantico.fr), 2015

Pierre Le Hir, Le scénario escamoté d'une France "100% énergies renouvelables", *Le Monde*, 2015

Ademe, Vers un mix électrique 100% renouvelable en 2050, rapport final, 2015