

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES ÉNERGIES DÉCARBONÉES DANS LA LUTTE CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE PROPOSITIONS POUR LES COMBINER EFFICACEMENT

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction	2
2	Les énergies décarbonées	2
2.1	Présentation	2
2.2	Spécificités	5
2.2.1	Énergie renouvelable	5
2.2.2	Énergie de flux et de stock	5
2.2.3	Production centralisée et décentralisée	5
2.2.4	Réactivité	6
2.3	Impacts	6
2.3.1	Environnementaux	6
2.3.2	Sociétaux	6
2.3.3	Économiques	7
3	Comment décarboner notre consommation d'énergie ?	7
3.1	S'attaquer aux énergies carbonées	7
3.2	Produire cette énergie décarbonée	8
3.2.1	Production de la biomasse	8
3.2.2	Production de l'électricité	8
3.2.3	Complémentarité électricité-biomasse	9
3.2.4	Maîtriser notre consommation	9
4	Bilan	9

AVANT-PROPOS

Jusqu'à présent, j'abordais ce sujet qui me tient à cœur à travers des lectures et des recherches ciblées, via certains de mes cours et en discutant avec des amis. Mais le fait de participer à ce concours m'a donné l'opportunité d'approfondir cette problématique, d'affiner certains points particuliers, de confronter thèse et antithèse, de structurer l'ensemble et d'élargir mon champ de vision. Cet effort a ainsi été très formateur.

Toutefois, je ne prétends pas avoir cerné un sujet aussi vaste et complexe. J'espère cependant en avoir distingué les grandes lignes. J'aurais aimé approfondir certains points, notamment dans des domaines en dehors de mes compétences habituelles, mais le temps n'est pas extensible. J'ai aussi essayé autant que possible de présenter le sujet de manière objective, tout en donnant quelquefois mon opinion sur certains aspects. Par ailleurs, étant donné la concision du document demandé, ce rapport est volontairement sobre, afin de privilégier le contenu et d'aborder autant que possible la problématique dans son intégralité.

Mon avis, ainsi que mes connaissances, gagneront de toute façon à être enrichis grâce aux échanges avec les acteurs du domaine de l'énergie, les plus qualifiés en la matière. L'intérêt que je porte à ce concours réside aussi justement dans la possibilité d'entamer de tels échanges.

Loïc FRAYSSINET
26/06/2015

1 INTRODUCTION

Que l'on en ait conscience ou pas, l'énergie est omniprésente. Elle intervient en effet au cœur de toutes nos actions, que ce soit pour nous déplacer, pour nous chauffer ou encore pour fabriquer les produits que nous consommons et que nous utilisons. Plus concrètement, elle se manifeste au quotidien par le gaz qui sort de notre cuisinière pour cuire nos aliments, par de l'essence qui coule de la pompe pour faire rouler nos voiture ou encore à travers la fameuse fée électrique, accessible en branchant nos appareils sur les prises et permettant d'effectuer toutes sortes de tâches.

Que l'on en ait conscience ou pas, le fait d'utiliser cette énergie -dite finale- a des répercussions sur le monde qui nous entoure. Généralement, notre perception de l'énergie s'arrête aux factures de gaz et d'électricité envoyées par notre fournisseur ou celle que l'on doit payer à la pompe. Mais l'on ignore (ou l'on omet) bien souvent que ces énergies proviennent de ressources fossiles et que l'utilisation de cette énergie est la principale cause du réchauffement climatique en cours. En effet, l'énergie consommée provient à plus de 80 % de ressources fossiles. Ces ressources sont dites carbonées car elles ont été formées il y a plusieurs millions d'années à partir de résidus végétaux et que leur utilisation (via la combustion) dégage notamment du CO₂, élément majoritairement responsable de l'augmentation de l'effet de serre.

C'est pourquoi il devient urgent de trouver des alternatives aux énergies primaires fossiles. L'objectif de ce rapport est de faire l'état des lieux des énergies dites décarbonées, et d'étudier comment il serait possible de les utiliser en substitution aux énergies fossiles.

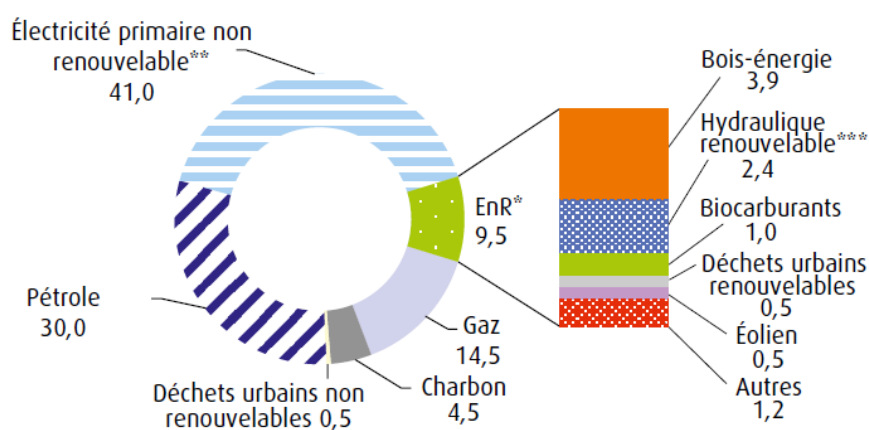
2 LES ÉNERGIES DÉCARBONÉES

Dans cette partie, nous présenterons brièvement les différentes énergies décarbonées actuellement à notre disposition, par ordre d'importance dans le bouquet énergétique français (voir figure 1). Une brève présentation de leur fonctionnement est nécessaire pour cerner leur contexte d'utilisation. Nous verrons ensuite quels sont les avantages et les inconvénients de chacune, ainsi que leurs spécificités.

Répartition de la consommation d'énergie primaire en France métropolitaine

Données corrigées des variations climatiques (259,6 Mtep en 2013)

En %



* EnR : énergies renouvelables.

** Comprend la production nucléaire, déduction faite du solde exportateur d'électricité (pour simplifier, le solde exportateur est retranché de l'électricité nucléaire) et la production hydraulique par pompage.

*** Hydraulique hors pompage.

Source : Caculs SOeS, d'après les données disponibles par énergie

FIGURE 1 – Bouquet énergétique français (d'après [1])

2.1 Présentation

LE NUCLÉAIRE Spécificité française, l'énergie nucléaire est largement dominante dans le bouquet énergétique français avec environ 40 % de l'énergie primaire consommée. Comme les centrales thermiques à flammes classiques, les centrales nucléaires alimentent en chaleur un cycle thermodynamique permettant de produire de l'électricité. Mais contrairement aux premières, la chaleur produite par les centrales nucléaires ne provient pas d'une réaction de combustion, mais d'une réaction nucléaire de fission. L'avantage de cette réaction nucléaire, par rapport aux réactions de combustion, est qu'elle n'émet pas de CO₂ et que cette réaction est bien plus énergétique -à masse égale- que les réactions de combustion (un

kilogramme d'uranium naturel, le "combustible" nucléaire, fournit environ 10 000 fois plus d'énergie qu'un kilogramme de charbon [2]). Cette technologie est mature et est largement exploitée en France, mais le parc est vieillissant. Par ailleurs, l'uranium n'est pas présent sur le sol français : le minerai est donc importé puis traité (enrichi) en France afin d'être utilisable par les centrales. Notons que le rendement des centrales nucléaires en France est d'environ 33 % ; les pertes se manifestent principalement sous forme de chaleur (dus au cycle thermodynamique) qui est évacuée dans l'air via des tours aéroréfrigérantes et/ou dans les rivières ou la mer situées à proximité.

LA BIOMASSE Ce terme désigne la matière végétale et animale. C'est avec cette matière que notre métabolisme (et celui des autres êtres vivants) puise son énergie. Mais cette énergie, longtemps la principale exploitée, n'est pas comptabilisée ici sous cette forme ! Pour les usages énergétiques, elle provient majoritairement des végétaux ; cette matière a été formée grâce à l'énergie solaire via la photosynthèse. On la trouve sous forme solide (dit aussi "bois-énergie") ou sous forme liquide et gazeuse (biocarburant et biogaz) après transformation.

D'une part, la biomasse solide se présente principalement sous forme de bois (brut, plaquette, granulé) et de déchets agricoles ou sylvicoles. Elle est principalement utilisée pour alimenter les cheminées dans le résidentiel et, de plus en plus, en tant que combustible pour les chaudières des réseaux de chaleur et des particuliers (à l'échelle mondiale elle est très largement exploitée pour la cuisson). Le rendement est généralement très bon (au moins 70 %) pour les technologies récentes. La biomasse solide peut aussi servir de combustible dans certaines centrales thermiques pour produire de l'électricité (rendement d'environ 30 %), généralement avec cogénération (valorisation des pertes par chaleur, ce qui augmente le rendement autour de 80 %).

D'autre part, la biomasse liquide et gazeuse est produite en faisant subir diverses réactions chimiques (selon le procédé) à la biomasse solide. Les biocarburants dits de première génération utilisent comme source de biomasse des plantations spécifiques (betterave, colza, canne à sucre) alors que ceux de deuxième génération, qui commencent seulement à entrer en phase industrielle, valorisent des résidus (déchets agricoles et sylvicoles). Des biocarburants de troisième génération sont également en développement. Ces derniers sont produits à partir d'algues qui présentent l'avantage d'avoir un bien meilleur rendement à l'hectare. Le rendement énergétique des unités de production/transformation est très variable selon les procédés et les technologies. Il est compris entre 30 et 80 % pour les carburants de première génération et est de 30-40 % pour ceux de seconde génération [5]. Ces biocarburants sont principalement utilisés par les véhicules, en complément ou en substitution aux carburants fossiles. On les retrouve également en tant que combustible pour produire de l'électricité et/ou de la chaleur, notamment dans les unités de méthanisation qui valorisent les déchets organiques ménagers et agricoles.

Dans les deux cas, la biomasse subit une réaction de combustion et dégage donc du CO₂. Toutefois, cette énergie est considérée décarbonée car la quantité de CO₂ dégagée lors de la combustion est égale à celle qui a été absorbée par la plante lors de sa croissance, via la réaction de photosynthèse. Cependant, les procédés associés à leur exploitation et leur transformation peuvent émettre du CO₂.

L'HYDRAULIQUE La force de l'eau, en entraînant des turbines, permet de produire de l'électricité. L'énergie hydraulique était autrefois convertie en énergie mécanique pour actionner les moulins. Désormais, elle représente la deuxième source d'énergie primaire pour la production d'électricité (environ 13 %) après le nucléaire. L'électricité est produite soit par des barrages en montagne qui utilisent la chute de l'eau depuis l'amont au niveau des retenues d'eau, soit par des stations au fil de l'eau qui utilisent le courant. Il existe aussi des stations de pompage/turbinage qui permettent de stocker l'énergie : lorsque l'électricité est excédentaire, elle est utilisée pour pomper l'eau en haut des retenues ; et inversement, lorsqu'il est nécessaire de produire de l'électricité supplémentaire, l'eau est libérée des retenues amont pour turbiner.

L'ÉOLIEN Jadis, l'énergie du vent était utilisée pour actionner les moulins à vent et pour déplacer les bateaux à voiles. De nos jours, cette énergie est convertie en électricité par des éoliennes que l'on trouve principalement sur terre (terrestre), mais aussi en mer (*off-shore*). L'incorporation de ces technologies est assez récente. Elles sont principalement regroupées dans des "fermes éoliennes", mais aussi, parfois, en dimension réduite chez les particuliers. Ce secteur connaît actuellement une forte croissance et les technologies ne cessent d'évoluer.

LE SOLAIRE Plusieurs technologies utilisent l'énergie solaire comme source d'énergie.

La plus connue et la plus répandue est la filière photovoltaïque (PV), qui convertit le rayonnement solaire en électricité. On retrouve les panneaux solaires PV regroupés dans des unités de production solaire (ferme solaire) ou dans le résidentiel-tertiaire notamment en toiture. Les rendements de conversion de ces unités sont variables, généralement autour de 10 à 20 % dans les conditions optimales. Comme l'éolien, ce secteur est en plein développement et les technologies évoluent très vite.

La chaleur du soleil est aussi valorisée directement, pour le chauffage ou pour produire de l'eau chaude (solaire thermique), voir même pour refroidir (climatisation solaire¹). Le rendement de conversion de ces unités (hors climatisation solaire) est bien meilleur, généralement supérieur à 70 %.

1. La climatisation solaire repose sur le principe d'une pompe à chaleur réversible fonctionnant en mode froid où la compression mécanique est remplacée par une compression thermique.

L'énergie thermique peut aussi être utilisée pour produire de l'électricité, on parle alors de solaire thermodynamique. Certaines de ces technologies ont été développées en France dans les années 80, mais sont restées cantonnées au stade expérimental. Mais ces technologies connaissent un regain d'intérêt à travers le monde.

LA GÉOTHERMIE Elle utilise la chaleur présente naturellement dans le sol. Cette dernière est récupérée à haute température au niveau de zones volcaniques pour produire électricité (site de Bouillante en Guadeloupe par exemple) et/ou chaleur (ou froid); ou à plus faible température dans des nappes profondes, naturellement chaudes, pour alimenter les réseaux urbains de chaleur (comme dans certaines villes de la région parisienne). D'autres technologies utilisent la chaleur du sol provenant de l'énergie solaire stockée en surface ou de l'énergie dégagée par le noyau terrestre (grande profondeur). Cette énergie est beaucoup plus diluée, elle nécessite donc des surfaces d'échanges importantes et sert généralement à préchauffer l'eau qui sera utilisée dans le résidentiel-tertiaire (eau chaude sanitaire ou chauffage).

LES ÉNERGIES MARINES Diverses technologies utilisent l'énergie de la mer, mais ne sont, à l'heure actuelle, que très peu développées. Les hydroliennes, notamment, fonctionnent sur le même principe que les éoliennes mais avec le courant marin. Des flotteurs ont été étudiés pour produire de l'électricité lorsqu'ils sont mis en mouvement par la houle. Ces technologies sont encore, pour beaucoup, expérimentales, mais commencent pour certaines à être testées en grandeur nature et à s'industrialiser.

L'énergie des marées est utilisée sur le même principe que les barrages (usine marémotrice), comme cela est le cas en France avec le barrage de la Rance.

Enfin, une dernière technologie utilise le gradient thermique des mers (le fait que la température en profondeur soit plus faible que celle en surface) pour entraîner un cycle thermodynamique et ainsi produire de l'électricité. Des projets expérimentaux ont vu le jour à la Réunion et un projet grandeur nature est en cours en Martinique.

D'autres énergies, dites renouvelables, sont présentées dans les bilans énergétiques. Comme nous le verrons, celles-ci ne sont pas entièrement renouvelables ni décarbonées. C'est pourquoi nous ne les présentons que maintenant.

LA VALORISATION DES DÉCHETS Dans le diagramme de répartition de la consommation énergétique (figure 1) apparaissent les "déchets urbains renouvelables", représentant une part aussi importante que l'éolien. Cette catégorie comprend la valorisation énergétique des déchets urbains, c'est-à-dire leur combustion, comme avec de la biomasse ou des combustibles fossiles, afin de produire de l'électricité et/ou de la chaleur. Ces déchets ne provenant pas nécessairement de la biomasse, leur combustion n'est pas neutre en carbone. Les règles européennes stipulent arbitrairement que cette énergie doit être comptabilisée pour moitié en tant que renouvelable. L'intérêt de cette technologie réside dans la réduction du volume des déchets et leur valorisation énergétique, ainsi que dans les émissions évitées par rapport à l'utilisation de combustibles purement fossiles.

Une autre forme de valorisation des déchets, uniquement biologique, permet de produire du biogaz (méthanisation).

LES POMPES À CHALEUR Elles apparaissent parfois parmi les énergies renouvelables. Elles sont capables de récupérer de la chaleur à basse température (air extérieur, sol, eau), et de relever cette température. Ces "pompes", pour fonctionner, sont alimentées en électricité. La part renouvelable comptabilisée correspond à l'énergie thermique prélevée à l'extérieur (autour de 2 fois l'énergie électrique absorbée). Les pompes à chaleur (PAC) sont principalement utilisées pour chauffer, mais, lorsqu'elles sont réversibles, peuvent aussi refroidir (climatiseur). L'aspect décarboné des PAC dépendra donc en partie de la source d'électricité².

SÉQUESTRATION DU CO₂ Les énergies présentées au début ne produisent pas directement de CO₂ et sont donc intrinsèquement décarbonées. Il est aussi envisagé de décarboner les énergies carbonées, c'est à dire de récupérer puis de stocker le CO₂ produit pour éviter qu'il ne soit émis dans l'atmosphère. Aucune technologie pertinente de ce type ne semble avoir vu le jour actuellement. Même pour les énergies non-fossiles, elles pourraient aussi s'avérer utiles pour limiter les émissions des centrales à combustibles provenant de la biomasse et ainsi diminuer provisoirement l'émission de ce gaz à effet de serre pour compenser en partie celles du passé.

Cette présentation nous a donné un tour d'horizon des énergies décarbonées à notre disposition. Nous allons maintenant étudier plus en détail certaines de leurs caractéristiques, en particulier dans l'optique de les utiliser concrètement en remplacement des énergies fossiles.

2. Rappelons que l'énergie électrique utilisée, qui sert principalement à comprimer le fluide frigorigère contenue dans la pompe à chaleur, peut être remplacée par de l'énergie thermique.

2.2 Spécificités

2.2.1 *Énergie renouvelable*

Pour commencer, il est important de noter qu'une énergie décarbonée n'est pas forcément renouvelable. Par renouvelable, on entend que la source d'énergie pourra se renouveler à une échelle de temps relativement courte à l'échelle humaine et donc être inépuisable. Ceci n'est évidemment pas le cas pour les combustibles fossiles, qui ont été formés sur plusieurs millions d'années, et pour l'uranium, qui, comme les autres minerais, n'est présent sur Terre qu'en quantité limitée. De même, la géothermie qui exploite des nappes souterraines naturellement chaudes (et non pas des points chauds comme les zones volcaniques) est vouée à être épuisée, généralement au bout de plusieurs dizaines d'années. En effet, la chaleur puisée n'est plus suffisamment régénérée dans le sol.

En revanche, les énergies produites grâce à l'action directe ou indirecte du soleil (cycle de l'eau pour l'hydraulique, différentiel thermique créant les vents pour l'éolien, photosynthèse pour la biomasse) sont clairement renouvelables car le soleil continuera de briller encore quelques milliards d'années. Toutefois, il faut veiller à ce que l'activité humaine ne perturbe pas trop ces cycles naturels, notamment pour la biomasse pour laquelle une gestion durable est nécessaire. De même, la géothermie de point chaud fonctionnera longtemps, tant que l'activité volcanique sera présente. Plus encore pour les énergies marémotrices utilisant la force d'attraction gravitationnelle, qui elle ne risque pas de disparaître !

2.2.2 *Énergie de flux et de stock*

Une notion importante à prendre en compte pour l'utilisation de l'énergie est la distinction entre énergie de flux et de stock. Cette notion est assez proche de la notion de renouvelable : les énergies non-renouvelables font appel à des stocks déjà formés bien avant nous (pétrole, gaz, uranium, nappe chaude) qui sont donc par nature, et à notre échelle de temps, limités. À l'opposé, les énergies renouvelables utilisent des flux de matière ou d'énergie dont la quantité peut varier dans le temps et selon le lieu considéré. L'énergie ne peut être récupérée que lorsque le flux se manifeste (lorsque le vent souffle, lorsque le soleil brille, lorsque la marée descend, etc.) et celui-ci peut être très variable³ (vent, soleil, pluie), mais aussi (relativement) constant (géothermie). La biomasse est aussi une énergie de flux étant donné qu'elle est consommée puis reproduite à une échelle de temps relativement courte.

Ceci nous amène donc à la notion d'intermittence. Les énergies utilisant des flux variables (intermittents) ne peuvent pas être produites à la demande, mais uniquement lorsque le flux se manifeste. Certaines peuvent toutefois être stockées (la biomasse et l'hydraulique) permettant d'adapter le flux à la demande. Par contre, celles produisant directement de l'électricité et de la chaleur sont plus problématiques car l'électricité ne se stocke pas en l'état, et la chaleur se stocke difficilement sur le long terme.

Le stockage est donc incontournable pour les énergies de flux, d'autant plus suivant leur niveau d'intermittence, et en particulier pour celles produisant de l'électricité (PV et éolien) où l'équilibre offre-demande doit être maintenu en permanence. Cet aspect doit être impérativement pris en compte avec les systèmes de productions eux-mêmes.

Par ailleurs, étant donné que les énergies intermittentes ne fonctionnent pas en permanence à leur puissance nominale, il est nécessaire d'installer plus de puissance que dans le cas d'une énergie non-intermittente pour une même production d'énergie annuelle (on parle de foisonnement). Pour les mêmes raisons, il sera plus pertinent d'installer les énergies intermittentes dans les régions où le potentiel récupérable est le plus important (régions ensoleillées pour le solaire, et régions venteuses pour l'éolien), contrairement aux énergies de stock où les centrales énergétiques peuvent être placées n'importe où du moment que le site s'y prête et que les stocks peuvent y être amenés.

2.2.3 *Production centralisée et décentralisée*

Classiquement, les centrales de production d'électricité étaient centralisées (nucléaire, thermique à flamme et gros hydraulique), mais depuis peu, les nouvelles technologies permettent aux particuliers de produire eux-mêmes leur énergie. La centralisation permet de concentrer la production d'électricité et produire une puissance de quelques gigawatts, et ainsi de diminuer les coûts d'ensemble et de mieux contrôler la production et donc la gestion de l'équilibre offre-demande. Mais celle-ci nécessite un important réseau de distribution (ligne haute tension) pour fournir de l'électricité sur tout le territoire, ce qui crée des pertes par distribution (pertes en ligne). La centralisation n'est possible que pour les énergies de stock ou si le flux est suffisamment concentré.

Au contraire, la production décentralisée est généralement produite dans des zones réduites et réparties sur le territoire. Les puissances mises en jeu sont plus faibles (de quelques kilowatts à plusieurs mégawatts). L'énergie produite est préférentiellement consommée à proximité, mais la gestion des excédents et des manques nécessite du stockage et/ou de renforcer les interconnexions entre territoires, de manière à répartir la consommation à l'échelle plus large afin de compenser les manques de puissance d'une région par les surplus d'une autre. Cette problématique concerne principalement l'électricité.

3. Variable ne veut pas dire imprévisible, les phénomènes peuvent être majoritairement prédits en avance avec suffisamment de précision.

2.2.4 Réactivité

Toujours concernant la production, il est important de noter que les différents systèmes de production d'énergie, notamment électrique, n'ont pas les mêmes capacités et les mêmes temps de réaction pour faire varier la puissance délivrée et s'adapter à la demande. Cette problématique ne concerne pas les énergies de flux variables étant donné que celles-ci produisent uniquement lorsque la ressource est disponible. En revanche les autres énergies (principalement de stock) sont capables de fonctionner sur demande, mais peuvent plus ou moins s'adapter à la demande. Le nucléaire notamment n'est pas apte à faire varier rapidement sa puissance, et sa mise en route est très longue. En revanche, les centrales à gaz ou à charbon ont des temps de réponse très courts ce qui permet d'ajuster la puissance électrique fournie en fonction de la demande. Cela est aussi possible avec les barrages hydrauliques, grâce aux réserves d'eau maintenues par ceux-ci. En France, cette adaptation est principalement assurée par l'hydraulique et par les centrales thermiques.

Cette problématique d'adaptation est renforcée par l'essor des énergies intermittentes en l'absence de stockage.

2.3 Impacts

En dehors de ces considérations techniques, l'aspect budgétaire est souvent primordial, mais les impacts sur l'environnement ne sont pas à négliger non plus.

2.3.1 Environnementaux

Le fait que les énergies présentées précédemment soient décarbonées n'implique pas forcément qu'elles n'aient pas d'impacts sur l'environnement.

Un aspect non-négligeable à prendre en compte est l'énergie grise, c'est à dire l'énergie nécessaire au processus de fabrication des composants, mais aussi l'impact environnemental des produits utilisés (produits chimiques, pollution des eaux, etc.) et la consommation des ressources (métaux, terres rares). Ces impacts sont pris en compte dans des analyses dites de cycle de vie. Pour beaucoup des nouvelles technologies renouvelables (éolien, photovoltaïque) ces impacts ne sont pas négligeables, notamment lorsqu'elles sont associées à des systèmes de stockage électrique (batteries). Cependant, ces technologies étant récentes, les processus de fabrication s'améliorent continuellement afin de réduire la consommation d'énergie, de recycler et de réduire l'impact environnemental. Généralement, les analyses de cycles de vie pour les éoliennes et les panneaux PV montrent que l'énergie produite par ces systèmes compense en grande partie l'énergie utilisée pour sa fabrication [3, 4]. Concernant la biomasse, ceci n'est pas toujours vérifié pour les biocarburants de première génération [5], mais là encore, le développement de ces technologies va dans le bon sens. Toutefois, il faut aussi considérer la réaffectation des sols, c'est à dire le changement d'usage des sols, par exemple d'une forêt à une culture, qui peut entraîner une libération brutale du CO₂ qui y était stocké.

Le nucléaire enfin, à cause de la forte radioactivité liée à son fonctionnement, représente de sérieux dangers sanitaires pouvant apparaître en cas de rejet d'éléments radioactifs dans l'environnement lors du transport et du stockage, et en cas de dysfonctionnements des centrales. Les conséquences d'un incident nucléaire pourraient être très importantes, mais la sûreté nucléaire est prise très au sérieux par les exploitants et les institutions, et il est forcé de reconnaître que les accidents sont rares et ont eu globalement moins d'impacts que nombre d'autres d'industries [6]. Il n'en reste que le risque existe toujours et pourrait s'avérer catastrophique. La gestion des déchets nucléaires est aussi particulièrement problématique. La quantité n'est certes pas énorme, notamment pour les plus radioactifs, mais la seule solution actuelle est de les stocker dans des entrepôts spécifiques, ce qui nécessite un contrôle particulier pour éviter toutes contaminations de l'environnement et intrusions, d'autant plus que leur durée de vie radioactive peut être importante. Notons que certains types de réacteurs nucléaires, dit surgénérateurs, permettraient de recycler une partie de ces déchets, mais cette technologie n'a jamais été généralisée. En définitive, le nucléaire nécessite un contrôle sévère et strict de nombreuses règles de sécurité, ce qui en fait une technologie difficilement transposable en dehors des pays dits "développés". De plus, la gestion des déchets est un problème qui concernera aussi les générations futures (au même titre que les pollutions des autres industries).

2.3.2 Sociétaux

Souvent en lien avec les impacts environnementaux, se pose aussi, et de plus en plus, la question de l'acceptation sociétale de l'installation de nouveaux systèmes de production d'énergie. Le risque radioactif lié au nucléaire est ainsi pris très au sérieux par une partie de la population, surtout suite aux accidents de Tchernobyl puis de Fukushima. Les projets de barrages et de fermes éoliennes ou solaires rencontrent eux aussi, régulièrement, d'importantes contestations principalement à cause de leur impact esthétique.

Enfin, l'utilisation de la biomasse peut être contestée, notamment en cas de conflit d'usage entre culture vivrière et énergétique. Pour cette dernière, notons que les biocarburants de deuxième génération permettent de s'affranchir de cette problématique.

2.3.3 Économiques

L'étude économique de l'énergie est un sujet à part entière et dépasserait mes compétences et les propos de cet exposé. Dans la suite, nous n'indiquerons que les tendances générales en nous appuyant en partie sur cette étude : [7].

Pour le moment, les principales énergies renouvelables (éolien et solaire) ne sont pas rentables et nécessitent d'être subventionnées, bien que les coûts de ces dernières ne cessent de diminuer et tendent actuellement à être compétitives par rapport aux énergies classiques. Grâce à leur maturité, le nucléaire et l'hydraulique font partie des énergies décarbonées les moins chères, bien que les travaux du nouveau réacteur nucléaire de Flamanville montrent que les techniques constructives des centrales nucléaires ne sont plus parfaitement maîtrisées comme elles l'ont été autrefois lors de la construction du parc français.

Pour conclure, au cours des prochaines années il est certain que les technologies modernes, y compris les systèmes de stockage, verront leur prix baisser progressivement à l'instar de leur énergie grise ; et il est probable qu'elles soient du même ordre de grandeur que les technologies actuellement matures, à condition de poursuivre leur développement.

3 COMMENT DÉCARBONER NOTRE CONSOMMATION D'ÉNERGIE ?

Dans la partie précédente nous avons vu quelles sont les énergies décarbonées et quelles sont leurs principales caractéristiques. Venons-en maintenant au point crucial de notre exposé : que faire pour décarboner notre énergie ?

3.1 S'attaquer aux énergies carbonées

La priorité pour réduire nos émissions de CO₂ est de remplacer les énergies fossiles par des substituts décarbonés. Nous étudierons les possibilités secteur par secteur (détails des secteurs dans [1]).

TRANSPORT Ce secteur est largement dominé par le pétrole, à plus de 90 %. Le pétrole utilisé pour le transport représente plus de 60 % du pétrole final consommé en France et 40 % de l'ensemble des énergies finales carbonées. Les alternatives sont la substitution des carburants fossiles par les biocarburants ainsi que la mobilité électrique -avec la possibilité d'associer les deux à l'aide des motorisations hybrides.

RÉSIDENTIEL-TERTIAIRE Ce second secteur consomme quasiment autant d'énergie finale carbonée que le transport, majoritairement composée de gaz et secondairement de pétrole. Cette énergie sert principalement au chauffage des bâtiments. Elle pourrait être remplacée par du biogaz, de la biomasse solide (bois énergie) et par de l'électricité avec l'utilisation de pompes à chaleur, bien plus performantes que les simples convecteurs électriques. Le solaire a aussi toute sa place pour assurer le chauffage des habitats, notamment en amont grâce à des bâtiments mieux conçus pour profiter des apports solaires, et en aval à l'aide de panneaux solaires thermiques.

INDUSTRIE Quant à elle, l'industrie consomme 10 % des énergies carbonées finales. Le gaz, le pétrole et le charbon représentent environ respectivement 30, 20 et 20 % de l'énergie finale utilisée par ce secteur. Le gaz pourrait être à terme remplacé par du biogaz (issu de biomasse) et remplacer les autres combustibles fossiles. L'électricité pourrait elle aussi être d'avantage utilisée (actuellement 30 %), avec la valorisation de la chaleur issue de la cogénération pour certains processus industriels. Enfin, la chaleur industrielle pourrait aussi avantageusement provenir du solaire thermique à concentration (haute température) avec l'un des substituts précédents en appoint.

PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ Bien que dominée par le nucléaire et l'hydraulique, la production d'électricité française a aussi recours aux énergies fossiles pour un peu moins de 10 % de la consommation d'énergie primaire fossile nationale. Les centrales thermiques, grâce à leur réactivité, jouent principalement le rôle d'appoint, en complément de l'hydraulique, notamment lors des pics de consommation électrique hivernaux. Leur remplacement nécessiterait la substitution des énergies fossiles par du biogaz, et/ou l'utilisation d'électricité renouvelable nécessairement associée à des systèmes de stockage.

L'AGRICULTURE Le faible pourcentage restant d'énergie carbonée est attribué à l'agriculture où elle représente tout de même 70 % de l'énergie finale consommée⁴. Cette énergie est utilisée principalement pour les engins agricoles, où les possibilités sont les mêmes que pour les transports, et pour le chauffage des espaces (étables, serres), où les remarques relatives au résidentiel-tertiaire sont aussi applicables.

Nous n'avons ici introduit que principalement les énergies décarbonées électriques ainsi que la biomasse. Les autres énergies décarbonées sont plus difficilement généralisables, mais elles ont tout intérêt à être exploitées lorsqu'elles sont

4. Toutefois, d'un point de vue émission globale de gaz à effet de serre (non uniquement liée aux usages énergétiques) ce secteur est l'un des plus importants émetteurs, mais cet aspect n'est pas abordé ici.

localement disponibles et exploitables, et notamment lorsqu'elles permettent de remplacer des énergies fossiles. Ceci est valable en particulier pour les territoires d'outre-mer, où les consommations énergétiques primaires sont largement d'origine fossile, alors que le potentiel renouvelable est très important (solaire, éolien, géothermie, énergies marines). De même, dans le résidentiel-tertiaire ces sources pourraient être valorisées dans le but d'être autoconsommées sur place ou à proximité, et ainsi de réduire la demande énergétique extérieure. Cela passerait par une meilleure intégration du bâti dans son environnement pour profiter au maximum des ressources disponibles (passivement via une bio-conception, et activement à l'aide de technologies décarbonées : solaire PV et thermique, géothermie, etc.).

3.2 Produire cette énergie décarbonée

Le point crucial de ce manuscrit est de déterminer comment, en pratique, parvenir à produire cette énergie décarbonée en remplacement des énergies fossiles, compte-tenu de leurs spécificités techniques et de leurs impacts environnementaux, sociétaux et financiers. Il est évident que ceci ne pourra pas se faire du jour au lendemain. Nous présentons ici les possibilités d'évolution du bouquet énergétique français qui permettraient de parvenir à cela.

3.2.1 Production de la biomasse

L'utilisation de la biomasse semble incontournable pour le transport et le chauffage (comprenant la possibilité de cogérer). La biomasse solide est largement sous exploitée en France, mais l'exploitation de celle-ci nécessitera de profonds changements, notamment pour parvenir à exploiter les nombreuses parcelles privées disséminées sur l'ensemble du territoire français. Mais son exploitation semble incontournable étant donné le nombre d'usage où elle pourrait être valorisée. Bien entendu, il est nécessaire que cette gestion soit faite de façon durable, et que l'avantage de la neutralité du cycle du CO₂ soit maximisé, c'est-à-dire que l'utilisation d'énergies fossiles soit minimisée lors des différents processus.

Concernant la production de la biomasse liquide, celle-ci devra d'abord s'appuyer sur la production de carburants de première génération produit sur le sol français (pour éviter d'importants transports), puis rapidement être suppléée par les carburants de seconde génération afin de prévenir tous conflits d'usages avec les cultures vivrières. Ce phasage se justifie par la nécessité de poursuivre le développement des technologies de seconde génération qui commencent tout juste à atteindre le stade industriel.

La biomasse ne pouvant à elle seul subvenir à nos besoins, elle devra être soutenue par la production d'électricité décarbonée.

3.2.2 Production de l'électricité

LA PLACE DU NUCLÉAIRE Grâce au nucléaire, la France est actuellement l'économie mondiale la moins carbonée (ratio émission de CO₂ sur PIB) [8]. Il est indéniable que sortir du nucléaire à court terme ne pourrait se réaliser qu'en augmentant nos émissions de CO₂ car les énergies renouvelables actuelles ne pourraient à elles seules subvenir à nos besoins, et le nucléaire serait certainement remplacé par des centrales à gaz, actuellement les plus intéressantes économiquement parlant [7]. Ainsi, face à l'urgence climatique, la technologie nucléaire, mature, rentable, et largement présente en France, semble incontournable. Toutefois, à plus long terme, la ressource nucléaire fissile étant limitée par nature [9] et face à l'incertitude que représentent les déchets radioactifs, il conviendra de lui trouver une alternative réellement durable qui ne compromette pas les générations futures, au même titre que les problèmes actuels de réchauffement climatique et de raréfaction des ressources fossiles. Ce changement pourrait être basé sur le développement des surgénérateurs, qui régleraient une partie du problème (sans toutefois le résoudre), voire même de la fusion, mais cette dernière technologie ne sera certainement pas accessible à temps.

L'ESSOR DES ÉNERGIES RENOUVELABLES C'est pourquoi, l'essor des énergies renouvelables semble incontournable. Ceci concerne, principalement l'éolien (terrestre et offshore) ainsi que le photovoltaïque qui sont plus facilement généralisables (en effet, le potentiel hydraulique est quasiment déjà complètement exploité et les autres sources moins bien réparties sur les territoires). Le photovoltaïque comporte notamment l'avantage de pouvoir facilement être installé chez les particuliers eux-mêmes. Leur montée en puissance (amélioration de leur processus de fabrication et des technologies, y compris le stockage associé) devra à terme permettre de fournir une part de plus en plus importante d'électricité. Il est certain que ce changement (passage d'un réseau électrique centralisé à un réseau décentralisé) aura des répercussions sur le réseau lui-même, et que des modifications seront à apporter. En revanche, ce développement sera tout à fait pertinent et adapté dans les pays en voie de développement où le réseau n'est pas très développé et où la demande énergétique ne cessera de croître, ainsi que dans nos territoires d'outre-mer largement dépendant des énergies fossiles et possédant pourtant un fort potentiel renouvelable.

Rappelons que les énergies renouvelables sont intermittentes et qu'il est nécessaire d'y associer du stockage et/ou de l'appoint⁵, actuellement assurés principalement par l'hydraulique et les centrales thermiques à flamme. Il faudra

5. Avec aussi la possibilité d'impliquer les usagers (directement ou via des automatismes) pour adapter leur consommation à la production (tarif variable, effacement pour limiter les pointes, etc.)

évidemment veiller à ce que ces systèmes de régulation (stockage et appoint) n'utilisent pas (ou le moins possible) d'énergie décarbonée. De multiples technologies sont en cours de développement et d'amélioration (volant d'inertie et air comprimé par exemple) dont certaines semblent prometteuses. Citons aussi notamment la possibilité de profiter de l'importante capacité de stockage que représenterait les batteries des véhicules électriques en cas de fort développement (toutefois la fabrication des batteries utilise beaucoup d'éléments polluants et des terres rares, bien que des technologies "plus propres" font peu à peu leur apparition). Dans la suite nous présenterons principalement les technologies *power-to-gas* et *gas-to-power* qui possèdent l'avantage de profiter d'installations existantes (réseaux de distribution et de stockage du gaz) et de technologies en partie existantes (centrale à gaz), et de lier deux vecteurs principaux de la transition énergétique (biomasse et électricité).

3.2.3 Complémentarité électricité-biomasse

Le principe des technologies *power-to-gas* et *gas-to-power* est le suivant : l'énergie excédentaire issue des renouvelables (jour de grand vent ou de fort ensoleillement) pourrait être valorisée pour produire du dihydrogène par électrolyse de l'eau ou du biogaz par méthanation (*power-to-gas*). Ce dihydrogène ou bien ce biogaz pourra ensuite être stocké (notamment de manière inter-saisonnière), ou utilisé en complément des biogaz issus de la biomasse aussi bien pour le chauffage que pour le transport, ou bien brûlé dans des centrales de cogénération pour produire de l'électricité en appoint (*gas-to-power*) et de la chaleur. Ces technologies ne sont pas encore matures mais en développement.

Le rendement de l'ensemble n'est, a priori, pas très important mais cette valorisation est tout à fait pertinente dans la perspective de l'essor des renouvelables et du couplage électricité-biomasse.

3.2.4 Maîtriser notre consommation

La dernière façon permettant de décarboner notre énergie et de mieux l'utiliser. Pour cela, les moyens disponibles sont les deux suivants : l'*efficacité*, c'est à dire consommer moins avec autant d'énergie, autrement dit, réduire les pertes ; et la *sobriété*, qui revient à limiter les usages inutiles et les gaspillages. Les actions d'efficacité visent à améliorer les processus et les technologies, ainsi qu'à valorisation ce que l'on considère parfois comme des pertes. A ce titre, la cogénération nucléaire comporte un important potentiel qu'il serait regrettable de ne pas exploiter, ne serait-ce qu'en partie. Par ailleurs, la sobriété repose principalement sur le comportement des consommateurs (chasse aux gaspillages, développement des modes de transports doux). D'importantes campagnes de sensibilisation sont nécessaires pour que chacun comprenne l'impact de ses consommations énergétiques. Ceci peut être facilité par l'instauration de compteurs intelligents capables de révéler en temps réel les consommations dues à nos usages. Les réglementations seront aussi certainement nécessaires pour guider ces comportements.

A cheval sur ces deux notions, on pourrait rajouter l'autoconsommation. Le résidentiel-tertiaire gagnerait et aurait tout intérêt à valoriser le potentiel de son environnement. Cela passe par une meilleure conception du bâti pour profiter des apports gratuits, et une instauration de technologies renouvelables pour assurer les besoins restants. Il serait alors quasiment possible de tendre vers une autonomie énergétique à condition d'adapter nos comportements et nos usages pour limiter la nécessité du stockage. L'autonomie n'est pas atteignable dans toutes les situations, mais y tendre permettrait en tout cas de soulager le réseau (à condition d'éviter les surplus pour ne pas le surcharger et complexifier sa gestion). Cette possibilité est aussi à étudier à l'échelle d'ensembles urbains, offrant la possibilité de mutualiser la gestion de l'énergie.

4 BILAN

Pour conclure, comme nous l'avons vu, la décarbonation de notre énergie passera prioritairement par la substitution des énergies fossiles dans les domaines du transport et du résidentiel-tertiaire, et ceci à l'aide du vecteur électrique et de la ressource biomasse. La France pourra s'appuyer sur sa production d'électricité déjà en grande partie décarbonée grâce au nucléaire pour se concentrer sur ces deux premiers secteurs. Pour autant il ne faudra pas passer à côté des ressources renouvelables qui représentent les seules ressources durables sur le long terme. Leur essor devra être progressif, au fur et à mesure de leurs améliorations et du développement de leurs faisabilités, en commençant par là où elles sont déjà pertinentes. Elles trouveront toute leur place de façon décentralisée, afin d'assurer localement nos consommations énergétiques. Ceci nous permettrait notamment de mieux prendre conscience de l'utilisation de l'énergie.

Bien évidemment, ce changement nécessite d'importants investissements qu'il sera nécessaire de faciliter et d'accompagner. Ceci devra passer par des mécanismes financiers permettant de valoriser les énergies renouvelables tout en discréditant définitivement les énergies fossiles (notamment, en prenant enfin en compte leur prix réel intégrant leurs conséquences sur notre planète). Peut-on détruire notre avenir sous prétexte que celui-ci n'est pas rentable ?

Pour finir, remarquons que nous sommes généralement conscients de l'impact de notre nourriture sur notre santé, et qu'en conséquence nous faisons de plus en plus attention à notre consommation alimentaire. Prendra-t-on aussi conscience de l'impact de nos consommations énergétiques (à travers nos actes quotidiens) sur la santé des générations futures et

plus généralement sur la vie terrestre ? Il est certain que cette prise de conscience n'est pas évidente car nous sommes déconnectés du monde de l'énergie et aussi parce que les impacts ne nous touchent pas directement... Il est temps de nous réapproprier l'énergie et de la considérer dans son ensemble, non plus seulement comme un produit consommable qui nous est dû, mais comme une opportunité qui nous est offerte, à condition de l'utiliser de façon responsable et pérenne.

RÉFÉRENCES

- [1] Commissariat général au développement durable, *Chiffres clés de l'énergie, édition 2014*, Février 2015
- [2] CEA, <http://www.cea.fr/jeunes/themes/l-energie-nucleaire> (consulté en juin 2015)
- [3] Photovoltaïque.info, *Analyse de Cycle de Vie*, <http://www.photovoltaique.info/Analyse-du-Cycle-de-Vie-ACV-du.html> (consulté en juin 2015)
- [4] Thierry DE LAROCHELAMBERT, *Economie de l'énergie éolienne, Partie A : analyse de cycle de vie éolien*
- [5] Hervé BICHAT et Paul MATHIS, *La biomasse, énergie d'avenir ?*, éditions Quæ
- [6] Jean-Marc JANCOVICI, *A propos de quelques objections fréquentes sur le nucléaire civil* http://www.manicore.com/documentation/articles/idee_nucleaire.html (consulté en juin 2015)
- [7] Jean-Marc JANCOVICI, *Qu'est-ce que le "vrai coût" de l'électricité ?* http://www.manicore.com/documentation/cout_elec.html (consulté en juin 2015)
- [8] Next 10, *Green innovation index*, 2015
- [9] Georges CAPUS, Directeur Marketing Amont du Cycle, Areva NC, *Que savons-nous des ressources mondiales d'uranium*, 2007

AUTRES SOURCES

- Amory B. LOVINS et le Rocky Mountain Institute, *Réinventer de feu*, Rue de l'échiquier
- Association négaWatt, *Manifest négaWatt*, Actes sud
- Carbone 4, *Etude des 4 trajectoires du DNTE*
- Claude ACKET et Pierre BACHER, *Diviser par quatre les rejets de CO₂ dus à l'énergie : Le scénario Negatep*, version actualisée - juin 2014
- Energine, <http://www.energine.com/>
- Manicore, <http://www.manicore.com/>
- Pierre ODRU, *Le stockage de l'énergie*, deuxième édition, Dunod
- Tecsol blog, <http://tecsol.blogs.com/>