

Les énergies renouvelables, des technologies en pleine évolution

Texte de la conférence de ir Michel HUART, version mise à jour du 21/06/2006
Maître de conférences à la Faculté des Sciences Appliquées de l'ULB
Secrétaire général de l'asbl APERE

Dans le cadre du colloque du 8 décembre 2005
« Avenir de l'énergie et énergies de l'avenir ? »
Organisé par l'A.Ir.Br et l'A.I.Ms

Cet exposé met l'accent sur des évolutions technologiques observées ou attendues dans le domaine des énergies renouvelables par la fédération européenne de la recherche et de l'industrie des énergies renouvelables (EREC)¹. Les opportunités pour la Belgique sont mises en exergue sur base des informations récoltées par l'association pour la promotion des énergies renouvelables (APERe) et la fédération professionnelle belge des entreprises du secteur de la production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables (EDORA).

Préalablement, les énergies renouvelables sont définies dans toute leur diversité, le gisement énergétique des sources renouvelables en Belgique est brièvement caractérisé, les éléments qui motivent le recours à des systèmes énergétiques qui les intègrent sont présentés et le contexte mondial, européen et belge de leur développement est rappelé.

| | |
|---|-----------|
| GLOSSAIRE..... | 2 |
| DÉFINITION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES ET DE L'URE..... | 3 |
| GISSEMENT ÉNERGÉTIQUE DES SOURCES RENOUVELABLES EN BELGIQUE | 4 |
| ÉLÉMENTS QUI MOTIVENT LE RECOURS AUX ÉNERGIES RENOUVELABLES..... | 7 |
| LES ÉNERGIES RENOUVELABLES DANS LE MONDE, EN EUROPE ET EN BELGIQUE – SITUATION ET PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT..... | 9 |
| ÉVOLUTION TECHNOLOGIQUE DES ÉNERGIES RENOUVELABLES ET OPPORTUNITÉS DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT | 12 |
| BUDGETS POUR LA RECHERCHE..... | 12 |
| ÉVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES OBSERVÉES OU ATTENDUES DANS LE DOMAINE DES ÉNERGIES RENOUVELABLES..... | 13 |
| <i>Biomasse-énergie</i> | <i>13</i> |
| <i>Eolien</i> | <i>14</i> |
| <i>Géothermie et chaleur naturelle.....</i> | <i>15</i> |
| <i>Mers et océans.....</i> | <i>16</i> |
| <i>Petite hydroélectricité</i> | <i>16</i> |
| <i>Solaire passif ou architecture climatique et bâtiments énergétiquement performants.....</i> | <i>17</i> |
| <i>Solaire thermique et réfrigération solaire.....</i> | <i>17</i> |
| <i>Solaire photovoltaïque.....</i> | <i>18</i> |
| <i>Intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique et petits réseaux électriques isolés </i> | <i>19</i> |
| CONCLUSIONS..... | 20 |

¹ European Renewable Energy Council, rassemble les 8 fédérations européennes de la recherche et de l'industrie des énergies renouvelables – www.erec-renewables.org

Glossaire

CES : Chauffe-eau solaire
CF : Consommation finale
CIB : Consommation Intérieure brute
C-SER : Chaleur produite à partir de sources d'énergie renouvelables
CV : Certificats verts
ER : Energies renouvelables
E-SER : Electricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables
K : Indice qui qualifie le niveau d'isolation thermique globale d'un bâtiment
PAC : Pompe à chaleur
PV : Photovoltaïque
URE : Utilisation rationnelle de l'énergie

AEBIOM : European Biomass Association - www.ecop.ucl.ac.be/aebiom
APERe : Association pour la Promotion des Energies Renouvelables asbl – www.apere.org
CWaPE : Commission Wallonne Pour l'Energie – www.cwape.be
EDORA : fédération de l'Electricité d'Origine Renouvelables et Alternatives asbl - www.edora.be
EGEC : European Geothermal Energy Council
EREC : European Renewable Energy Council, rassemble les 8 fédérations européennes de la recherche et de l'industrie des énergies renouvelables – www.erec-renewables.org
EPIA : European Photovoltaic Industry Association - www.epia.org
ESHA : European Small Hydropower Association – www.esha.be
ESTIF : European Solar Thermal Industry Federation – www.estif.org
EUBIA : European Biomass Industry Association – www.eubia.org
EUREC : European Association of Renewable Energy Research Centers – www.eurec.be
EWEA : European Wind Energy Association – www.ewea.org
ValBiom: Valorisation de la Biomasse asbl – www.valbiom.be

Définition des énergies renouvelables et de l'URE

Sont qualifiées d'énergies renouvelables les formes utiles² d'énergie provenant d'une source renouvelable³, c'est-à-dire dont la valorisation actuelle n'en limite pas la disponibilité future, ou en d'autres termes dont la capacité de renouvellement est supérieure à leur niveau d'exploitation.

Par opposition aux énergies fossiles et fissiles qui sont des énergies de stock, les énergies renouvelables sont des énergies de flux : elles se régénèrent en permanence au rythme du soleil et de ses dérivés (le vent, les cours d'eau, les vagues, les courants marins, la chaleur naturelle et la croissance de la biomasse⁴), ainsi que des marées et de la chaleur naturelle de la terre.

Par extension, les systèmes transformant ces sources sont aussi appelées « énergies renouvelables ». Ils regroupent un grand nombre de technologies différentes, selon la source d'énergie valorisée et la forme d'énergie utile obtenue. Les principales filières d'énergies renouvelables présentes en Belgique sont reprises dans la liste ci-après :

Bâtiments énergétiquement performants⁵ (Architecture climatique, bâtiments basse énergie, passifs⁶ et énergie+⁷) : Optimiser le bâtiment pour limiter les pertes, privilégier les apports solaires passifs utiles et valoriser les sources renouvelables locales (soleil, chaleur naturelle et bois)

Biocarburants (Cultures énergétiques, procédés d'extraction) : Biomasse → Carburant

Biométhanisation (Unités de biométhanisation, équipements de combustion ou de cogénération) : Biomasse humide → Biogaz → Chaleur utile et/ou électricité

Chauffage à la biomasse⁸ (Equipements de combustion) : Biomasse → Combustible → Chaleur utile

Electricité ou cogénération à partir de biomasse (Equipements de cogénération) : Biomasse → Combustible → Electricité et si cogénération, chaleur utile

Eolien (Eoliennes sur terre et en mer) : Vent → Energie mécanique → Electricité

Géothermie et chaleur naturelle (Puits géothermiques ou pompes à chaleur) : Chaleur naturelle + électricité → Chaleur utile

Hydroélectricité (Centrales hydroélectriques) : Cours d'eau ou courants marins ou vagues → Energie mécanique → Electricité

Solaire photovoltaïque (Systèmes solaires photovoltaïques) : Soleil → Electricité

Solaire thermique (Chauffe-eau solaires pour l'eau sanitaire et/ou le chauffage et/ou les piscines ; Réfrigération solaire ; Séchage solaire) : Soleil → Chaleur utile (ou froid)

² Par forme utile d'énergie, on entend une forme d'énergie recherchée (par exemple, de la chaleur, du froid ou une énergie mécanique) ou directement utilisable pour le consommateur final (par exemple de l'électricité, un combustible)

³ L'Union européenne dans sa Directive 2001/77/CE définit les sources d'énergie renouvelables comme étant les « sources d'énergie non fossiles renouvelables (énergie éolienne, solaire, géothermique, houlomotrice, marémotrice et hydroélectrique, biomasse, gaz de décharge, gaz des stations d'épuration d'eaux usées et biogaz) ». La biomasse est définie comme « la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture (comprenant les substances végétales et animales), de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux ».

⁴ Dans ce dernier cas, il faut veiller à ce que la forêt et les surfaces agricoles ou les déchets organiques soient gérés de façon durable et responsable. Par exemple, il ne faut pas prélever plus de bois que la forêt ne pourrait produire, ni utiliser de manière inconsidérée des intrants agricoles énergivores et polluants.

⁵ *Stricto sensu*, seule l'architecture climatique fait partie des énergies renouvelables, mais cette approche fait partie intégrante d'une conception architecturale globale visant la performance énergétique du bâtiment. Nous avons jugé utile de parler ici de performance énergétique des bâtiments, qui intègre l'architecture climatique.

⁶ Le terme « Maison passive » fait référence à un standard de construction qui assure une ambiance intérieure confortable tant en hiver qu'en été sans devoir faire appel ni à un système conventionnel de chauffage, ni à un conditionnement d'air. Il nécessite une demande annuelle de chauffage < 15 kWh/m²/a et une demande globale d'énergie (chauffage, eau chaude et électroménagers) < à 42 kWh/m²/a. Pour ce faire, il combine adéquatement les technologies, la conception et les matériaux.

⁷ Une maison énergie+ est une maison dont le bilan énergétique des consommations et de la production d'énergie est positif, c'est-à-dire une maison qui produit plus d'énergie qu'elle n'en consomme

⁸ Le bois est la biomasse sèche principale, mais il y a aussi les céréales (grains et paille). Pour des raisons énergétiques et environnementales, la biomasse doit impérativement être sèche et non traitée et les équipements de combustion doivent avoir les rendements de conversion énergétique élevés (au moins 60%).

L'utilisation rationnelle de l'énergie (URE) fait le choix des solutions qui s'accompagnent de la dépense énergétique la plus petite. Il s'agit de faire la chasse aux gaspillages, d'utiliser des équipements énergétiquement efficaces, de préférer les matériaux et services ayant un faible contenu énergétique, mais aussi d'analyser l'opportunité du service induisant la dépense énergétique et d'intégrer la sobriété énergétique.

La dépense énergétique comprend l'énergie consommée pour le service voulu (se chauffer, se déplacer, mener ses diverses activités), mais également celle contenue dans les objets, matériaux ou services utilisés⁹, ainsi que les dépenses induites pour le futur¹⁰.

Il est important d'insister sur le fait que l'utilisation rationnelle de l'énergie (URE) ne se limite pas à la manière d'utiliser l'énergie, mais aussi à l'opportunité de son utilisation.

Gisement énergétique des sources renouvelables en Belgique

Le **soleil** a une température périphérique de 6 000°C. Une infime partie de l'énergie qu'il émet¹¹ atteint la surface de la terre. L'irradiation solaire moyenne annuelle sur une surface horizontale en Région wallonne est de 1 000 kWh/m², ce qui équivaut à l'énergie libérée par la combustion de 100 litres de mazout. Sous nos latitudes, cette énergie solaire est inégalement répartie sur l'année (statistiquement, elle est 8 fois supérieure durant le mois de juin par rapport au mois de décembre)¹².

Le **vent** est l'expression du déplacement de masses d'air. Pratiquement, l'énergie éolienne dépend surtout de la vitesse du vent et de la surface traversée par les pales, et donc de la taille de l'éolienne. La puissance électrique effective développée par une éolienne est comprise entre zéro et sa puissance "nominale", en fonction de la vitesse réelle du vent, qui est variable ; une unité standard, le nombre d'heures équivalentes (h_{eq}), a donc été définie¹³. On observe que le h_{eq} annuel des parcs éoliens terrestres en Belgique se situe généralement entre 1 500 heures et 2 500 heures, et en mer entre 2 800 et 3 800 heures. Avec des éoliennes de 1 à 3 MW, la densité d'installation est donc de 6 à 10 MW/km². L'équipement de parcs éoliens offshore des zones libres du territoire maritime belge permettrait de produire entre 65 et 79 TWh ou l'équivalent de l'électricité consommée annuellement par la Belgique.¹⁴

L'énergie potentielle des **cours d'eau** est fonction du débit et de la différence de niveau entre l'amont et l'aval de la centrale (hauteur de chute). Cette forme d'énergie est globalement bien exploitée en Belgique, qui est équipée d'un parc d'une cinquantaine de centrales hydroélectriques dont la puissance installée totale est d'environ 100 MW¹⁵. La production électrique de cette filière dépend fortement du régime de précipitations. Sur la période 1997-2004, la production annuelle a été comprise entre 240 et 460 GWh¹⁶. A moyen terme, le parc hydroélectrique pourrait atteindre une puissance installée de 150 MW par le biais de nouvelles centrales "au fil de l'eau"¹⁷, situées sur (1) des barrages et écluses des voies navigables non encore équipés de turbines et (2) des sites hydroénergétiques

⁹ C'est l'énergie qui a été consommée tout au long de leur cycle de vie

¹⁰ Par exemple, un habitat dispersé augmente les besoins en déplacement des habitants tout en rendant inefficace les transports en commun. D'autre part, il augmente les infrastructures et leur frais de fonctionnement.

¹¹ Sous la forme de lumière, c'est un spectre de rayonnement électromagnétique

¹² Données de l'IRM

¹³ Le nombre d'heures équivalentes (h_{eq}) est le nombre d'heures de fonctionnement de l'installation à sa puissance nominale qui produirait la même quantité d'énergie que celle qui est réellement produite. Dans le cas d'une installation dont le régime de travail est variable, la productivité annuelle est déterminée par l'indicateur h_{eq} , ce qui permet notamment de comparer différents systèmes entre eux. Il est compris entre 0 et 8 760 heures.

¹⁴ "Optimal offshore wind energy developments in Belgium" 3E, RCMG Universiteit Gent, ESAT; Scientific Support Plan for a Sustainable Development Policy (SPSD II); may 2004.

¹⁵ Entre 100 et 110 MW, selon les sources et selon que l'on considère la puissance développable ou la puissance installée

¹⁶ « Renouveau, Revue des énergies renouvelables » n°13 p 31 – 2005

¹⁷ Une centrale au fil de l'eau est une centrale sans réservoir d'accumulation d'eau (barrage de retenue de grande dimension)

anciennement exploités. Le $h_{\text{éq}}$ annuel des centrales hydroélectriques wallonnes varie entre 4 000 heures et 7 000 heures.

Par ailleurs, les **courants marins** et les **vagues** en Mer du Nord sont une ressource d'énergie non encore estimée en Belgique, mais a priori elle représente un gisement important, proportionnel à la surface exploitée et à la vitesse au cube des courants et pour ce qui est des vagues, au carré de l'amplitude.

La **biomasse** est le produit de la photosynthèse des végétaux. Cette réaction photochimique transforme et stocke l'énergie solaire sous forme d'énergie chimique¹⁸. Cette transformation peut atteindre une efficacité maximum de 5%¹⁹, mais dans les conditions typiques de nos régions, la limite se situe plutôt aux alentours de 0,6%²⁰, soit annuellement 6 kWh/m², ou encore 12 tonnes de biomasse sèche, soit l'équivalent énergétique de 60 MWh/ha.²¹ Il faut cependant garder à l'esprit que, outre les filières alimentaires, la valorisation sous forme d'énergie n'est pas la seule utilisation possible de la biomasse²².

La **chaleur naturelle** présente à la surface de la terre provient principalement du soleil. Cependant, la terre renferme également des gisements de chaleur, dits géothermiques, sous l'écorce terrestre. La chaleur issue de ces gisements qui atteint la surface de la terre (par conduction) est de l'ordre de 0,04 à 0,06 W/m²²³ en Belgique. Par ailleurs, il est possible d'exploiter la chaleur géothermique avec des puits géothermiques. Ceux-ci vont puiser les calories dans l'écorce terrestre là où des mouvements convectifs permettent le renouvellement du réservoir de chaleur. Le potentiel d'un gisement géothermique est donc fonction de sa température²⁴ et de sa capacité de renouvellement thermique.

La ressource énergétique primaire de l'ensemble des sources renouvelables dépasse largement les besoins²⁵ de notre société.²⁶ Cependant, leur exploitation à grande échelle requiert de l'espace là où la source est disponible. De ce point de vue, la Belgique est tributaire d'une densité de population importante et d'un habitat dispersé²⁷, deux éléments contraignants qui limitent le potentiel de valorisation. Une « bonne » gestion de l'aménagement du territoire est le paramètre clé pour exploiter au mieux la ressource énergétique renouvelable locale.

Le potentiel des énergies renouvelables pourrait dépasser largement nos besoins, mais leur contribution dans le bilan énergétique dépend des surfaces mises à disposition, des investissements pour leur équipement et de la réduction des consommations. Le tableau ci-après sur les ressources énergétiques primaires et finales disponibles en Belgique présente des ordres de grandeurs par unité de surface. Une bonne gestion de l'aménagement du territoire est notamment un paramètre clé car il définit les limites de la ressource exploitable.

Le tableau ci-dessous permet de calculer les ressources énergétiques primaires brutes disponibles à l'échelle locale en Belgique, ainsi que les quantités d'énergie finale (formes utiles) potentiellement disponibles, sur base des technologies actuelles. La mise en œuvre pratique des potentiels renouvelables est principalement fonction de la superficie qui y est consacrée²⁸, et donc des choix en termes d'aménagement du territoire.

¹⁸ Via des liaisons C-C et C-H, dans les hydrates de carbone et les lipides

¹⁹ C'est pour 100 unités d'énergie solaire, uniquement 5 unités d'énergie pourront être transformées en énergie chimique dans les végétaux

²⁰ Gérard SARLOS dans « Systèmes énergétiques » p 337 ; PPUR2003

²¹ La surface agricole belge est de l'ordre de 13 500 km² et la surface forestière est de l'ordre de 6 000 km². INS – Annuaire statistique de la Belgique 1991

²² Voir à ce sujet les synthèses publiées par l'asbl Valbiom (www.valbiom.be)

²³ Raymond FERNANDES dans « La chaleur de la terre » p168 ; ADEME 1998

²⁴ La valeur moyenne du gradient thermique est de 30°C/km (selon Gérard SARLOS dans « Systèmes énergétiques » p 368; PPUR 2003). Par exemple à Saint Ghislain, près de Mons, un puits de 2 400 mètres de profondeur fournit de l'eau à 72°C.

²⁵ En 2000, la CIB de la Belgique était de 57,2 Mtep (ou 663 TWh) et la CF de 36,9 Mtep (ou 428 TWh)

²⁶ Sur base du tableau de synthèse ci-après.

²⁷ Un habitat dispersé est doublement pénalisant : d'une part, il augmente les besoins d'énergie (déplacements et infrastructure) et d'autre part, il réduit l'espace disponible pour l'exploitation des sources renouvelables.

²⁸ En particulier pour l'énergie éolienne (parcs éoliens) et la biomasse (forêts et cultures énergétiques)

A noter par ailleurs que la quantité d'énergie renouvelable disponible localement peut être augmentée par les importations. Seules les formes « carburants » (huiles végétales et dérivés, bioéthanol, biodiesel, biogaz), « combustibles » (bois sous la forme de bûches, granulés ou plaquettes) et l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables (E-SER) peuvent être importées.

| Source d'énergie | Ressource énergétique annuelle primaire brute | Ressource énergétique annuelle sous forme utile sur base des technologies actuelles |
|---------------------------|--|---|
| Soleil | 1 000 GWh/km ² | Chaleur : 390 GWh _{th} /km ² (rendement de conversion moyen annuel de 39% ²⁹ pour les applications thermiques) Electricité : 100 GWh _e /km ² (rendement de conversion moyen annuel de 10% ³⁰ par des systèmes photovoltaïques) |
| Vent (terre) | Non déterminé | Electricité : 9 à 25 GWh _e /km ² |
| Vent (mer) | Non déterminé | Electricité : 17 à 39 GWh _e /km ² |
| Cours d'eau | Non déterminé | Electricité : 400 à 700 GWh _e (parc de 110 à 150 MW) |
| Courants marins et vagues | Non déterminé | Dépend des surfaces exploitées, vitesses du flux et amplitudes des vagues |
| Biomasse | 6 GWh/km ² (Energie chimique stockée par la photosynthèse, dans les conditions climatiques moyennes en Belgique) | Chaleur : 3 à 4,8 GWh _{th} /km ² (rendement de conversion biomasse - chaleur de 50 à 80%) Electricité : 0,6 à 1,8 GWh _e /km ² (rendement de conversion biomasse - électricité de 10 à 30%) |
| Chaleur naturelle | Non déterminé | Dépend de la t° et de la capacité de renouvellement de la source |

Tableau synthèse : Ressource énergétique annuelle de la Belgique ³¹

Les **réseaux électriques** actuels mériteraient d'être étendus vers les zones à potentiel d'exploitation des ressources locales en énergie et de stockage énergétique (par exemple, nouvelles unités de pompage/turbinage), afin de faciliter leur développement. Ils devront par ailleurs être adaptés et gérés de façon à pouvoir valoriser les productions décentralisées (énergies renouvelables et cogénération).

Mais au delà de la possibilité d'exploiter les ressources énergétiques, le « **bon aménagement du territoire** » est aussi celui qui minimise les besoins énergétiques qu'il engendrera pour les habitants (logement, déplacements), et ce d'autant plus qu'il concerne une longue période³². Par exemple, un habitat dispersé augmente les besoins en déplacements, tout en rendant moins efficaces les transports en commun. D'autre part, il augmente les besoins en infrastructures³³, leur coût, ainsi que les dépenses énergétiques de fonctionnement qui y sont liées³⁴.

Enfin, les énergies renouvelables s'accompagneront utilement d'une **utilisation rationnelle de l'énergie (URE)**.

²⁹ « Bilan énergétique wallon 2003 – Energies renouvelables » ; ICEDD pour MRW, DGTR

³⁰ 800kWh/kWc et 125 Wc/m² [Je ne comprends pas bien à quoi servent ces 2 chiffres]

³¹ Ne tient pas compte des importations. Il s'agit de la « production primaire belge ».

³² Quelques idées de durées : le choix d'un équipement individuel de type électroménager ou chaudière concerne une période de 5 à 15 ans, une habitation de 30 à 100 ans et l'aménagement du territoire d'une région de plus de 100 ans

³³ Réseau d'eau, d'égout, d'énergie, routes ...

³⁴ Déplacement et pertes de distribution

Eléments qui motivent le recours aux énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont une composante importante du développement durable. En effet, couplées à une utilisation rationnelle de l'énergie, elles réduisent le recours aux systèmes énergétiques classiques basés sur des ressources d'origine fossile ou fissile, et donc par conséquent les pressions environnementales et socio-économiques de l'utilisation de ces dernières.

L'objectif premier des énergies renouvelables est d'offrir un service énergétique à notre société à un prix acceptable. Mais par ailleurs, le coût de ce service a un impact sur l'économie locale, l'environnement et la société en général. Comme rappelé dans le Livre Blanc de la Commission européenne³⁵, en comparaison avec les solutions conventionnelles, la valorisation des énergies renouvelables crée plus d'emplois, renforce l'économie locale, réduit l'impact environnemental et atténue la convoitise sur les stocks d'énergie et donc est source de paix.

D'un point de vue environnemental, les énergies renouvelables contribuent à la réduction des émissions des gaz à effet de serre³⁶, réduisent la pollution de l'air, de l'eau, du sol et de la biosphère, limitent le risque d'accident (marées noires, explosions ...), et préservent les stocks de ressources naturelles³⁷. Cependant elles peuvent avoir des impacts environnementaux locaux spécifiques à chaque application et au lieu d'implantation (occupation du sol, paysage, bruit, modification de l'écosystème). Dans la plupart des cas cependant, une évaluation environnementale locale permet de mettre en œuvre des solutions appropriées.

D'un point de vue économique, les énergies renouvelables garantissent un prix stable de l'énergie, nettement moins sensible aux fluctuations du marché des combustibles fossiles, et diminuent notre dépendance énergétique³⁸. Par ailleurs, elles renforcent l'économie locale via les entreprises actives dans le secteur (fabricants, installateurs, équipementiers, ou encore entreprises chargées de l'exploitation, l'entretien ou la maintenance des installations). Dans les conditions actuelles, le prix de revient des énergies renouvelables peut cependant être plus élevé que celui des énergies fossiles³⁹. En appliquant le principe du « pollueur-payeur », ce « surcoût » peut être réparti sur les consommateurs⁴⁰, mais pour les entreprises dont la facture énergétique représente une part significative de leurs charges, ce surcoût, aussi minime soit-il, peut constituer une perte de compétitivité sur le marché international. Mais pour les pouvoirs publics, il est important de garder à l'esprit que le développement des énergies renouvelables est favorable au développement économique local dans la mesure où la totalité des dépenses concernent du matériel ou des services européens (et donc de l'emploi)⁴¹. Au contraire des systèmes classiques utilisant des combustibles fossiles, où jusqu'au 3/4 du prix de revient résultent de l'achat de combustibles importés (gaz naturel, produits pétroliers ou charbon).

Ainsi, les mécanismes de soutien financier aux énergies renouvelables sont un juste rééquilibrage économique dans un marché libéralisé qui n'intègre ni les externalités de la production énergétique classique, c'est-à-dire le coût des effets indirects sur l'environnement et la santé (gaz à effets de serre, marées noires, déchets dangereux), ni les aides indirectes accordées au secteur de l'énergie (recherche et développement, infrastructures, remise en

³⁵ Livre Blanc COM (97)599 établissant une stratégie et un plan d'action communautaire pour les sources d'énergie renouvelables.

³⁶ Par rapport à une source fossile d'énergie, et à quantité équivalente d'énergie consommée

³⁷ A condition toutefois que ces dernières soient gérées de façon "durable"

³⁸ En tout cas pour les sources locales d'énergies renouvelables (solaire, éolien ...), à l'exclusion des importations de bois ou de biocarburants par exemple

³⁹ Sauf s'il est tenu compte des externalités négatives (principalement les coûts indirects sur l'environnement et la santé) et positives (renforcement de l'économie locale).

⁴⁰ Répartition du surcoût sur le prix de vente, comme c'est le cas avec le mécanisme de marché des certificats verts

⁴¹ Le budget « Aide » est récupéré indirectement par les entrées fiscales associées aux activités locales générées (Impôt, TVA) et la réduction des dépenses pour la sécurité sociale (en relation avec un nombre d'emplois plus important).

état de sites), ni les bénéfices indirects pour la société liés au développement des énergies renouvelables (indépendance énergétique, renforcement économique local, emplois).

Les énergies renforcent l'économie locale dans la mesure où il n'y a pas de dépense pour des combustibles fossiles importés. Par exemple, $\frac{3}{4}$ du prix de revient de la production d'électricité par une TGV sont l'achat de gaz naturel, alors que 100% du prix de revient d'un parc éolien concerne l'achat d'équipements, de la main d'œuvre et des frais financiers.

D'un point de vue social, les énergies renouvelables s'accompagnent généralement de la création d'emplois durables et peu sensibles aux délocalisations. Leur caractère décentralisé permet par ailleurs aux sociétés locales de s'approprier la production d'énergie nécessaire à leurs besoins, tout en offrant un potentiel de réorientation de l'activité économique. Ainsi par exemple, la biomasse-énergie constitue une possibilité de diversification pour les secteurs agricole et sylvicole. Dans le domaine du bois-énergie, par exemple, on a montré que les filières bois peuvent générer de 10 à 28 fois plus d'emplois directs qu'une filière fuel, en fonction de leur degré de mécanisation⁴².

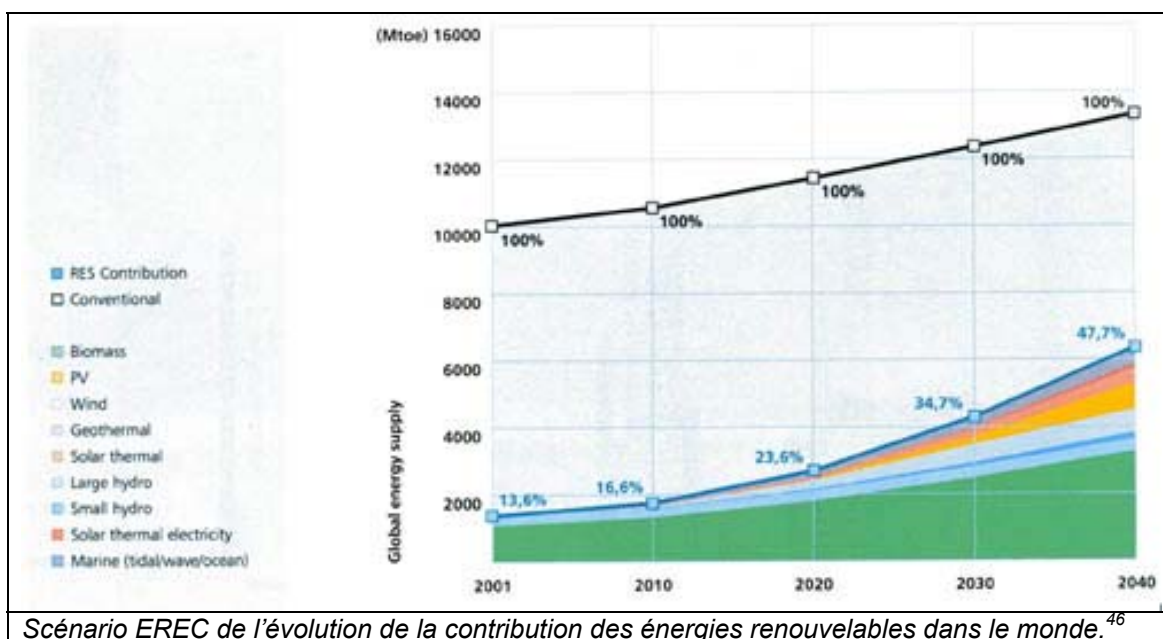
Localement, la visibilité et l'implication d'acteurs proches dans les énergies renouvelables constituent également un excellent vecteur d'éducation à l'utilisation rationnelle de l'énergie. A grande échelle, l'indépendance énergétique réduit les tensions internationales et permet la solidarité entre les peuples.

⁴² Schenkel Y., Temmerman M., Marchal D., Schaar C. [2005]. Une analyse comparative de l'impact sur l'emploi d'une installation de chauffage au bois. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2005 **9** (1), 53-64.

Les énergies renouvelables dans le monde, en Europe et en Belgique – Situation et perspectives de développement

La contribution des énergies renouvelables peut être exprimée globalement, mais aussi par les principales formes d'énergie de la consommation finale **électricité**, **chaleur** et **carburants**. D'autre part, il faut toujours mentionner s'il s'agit d'**énergie finale** (après transformation pour un usage final) ou d'**énergie brute** (énergie primaire). Ceci est particulièrement important quand la forme d'énergie est l'électricité pour lesquels les rendements de conversion⁴³ sont fort différents d'une centrale électrique à une autre.

Rappelons qu'il y a deux actions qui permettent d'augmenter la contribution des énergies renouvelables : **accroître leur productivité** et **réduire les consommations**. Ainsi par exemple, la directive sur la performance énergétique des bâtiments⁴⁴ vise à valoriser l'énorme gisement d'économie d'énergie⁴⁵ et à intégrer dans les bâtiments des systèmes valorisant les sources d'énergie renouvelables.



Scénario EREC de l'évolution de la contribution des énergies renouvelables dans le monde.⁴⁶

En 2001 **dans le monde**, 13,6% de l'énergie consommée était d'origine renouvelable essentiellement par les contributions de la biomasse et de l'hydroélectricité.⁴⁷ Aujourd'hui avec les développements constatés et les perspectives des biomasses, de l'éolien, de la petite hydroélectricité, des différents systèmes solaires et de la géothermie, couplé à une maîtrise des consommations, un scénario qui présenterait **en 2040 une part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique mondial de 50%** est avancé par la fédération européenne de la recherche et de l'industrie des énergies renouvelables, EREC.

⁴³ Énergie primaire ou énergie brute → Électricité chez le consommateur

⁴⁴ DIR 2002/91/CE du 16 décembre 2002 – JO 4 janvier 2003

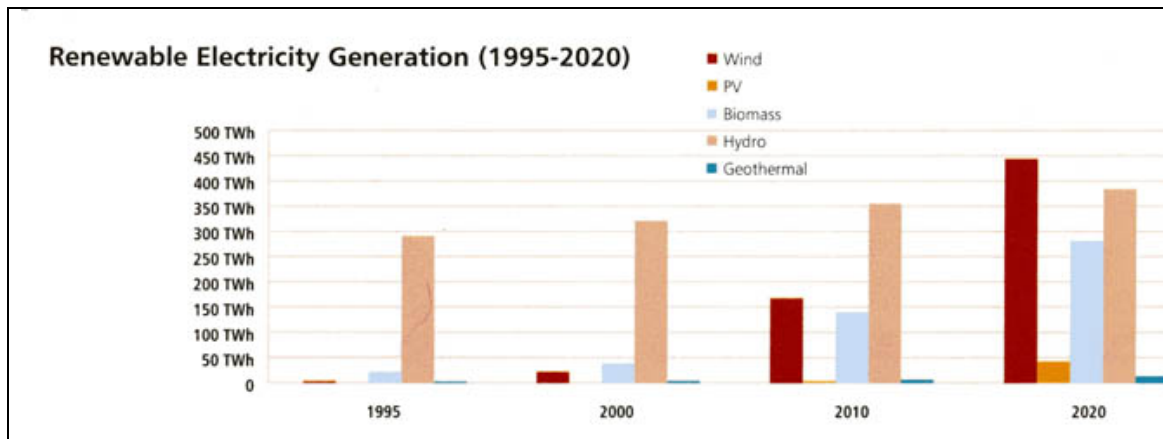
⁴⁵ Conception et amélioration de l'enveloppe des bâtiments et l'efficacité énergétique de leurs équipements

⁴⁶ European Renewable Energy Council, rassemble les 8 fédérations européennes de la recherche et de l'industrie des énergies renouvelables – www.erec-renewables.org
« Renewables energy scenario to 2040 – Half of the global supply from renewables in 2040 » - www.erec-renewables.org

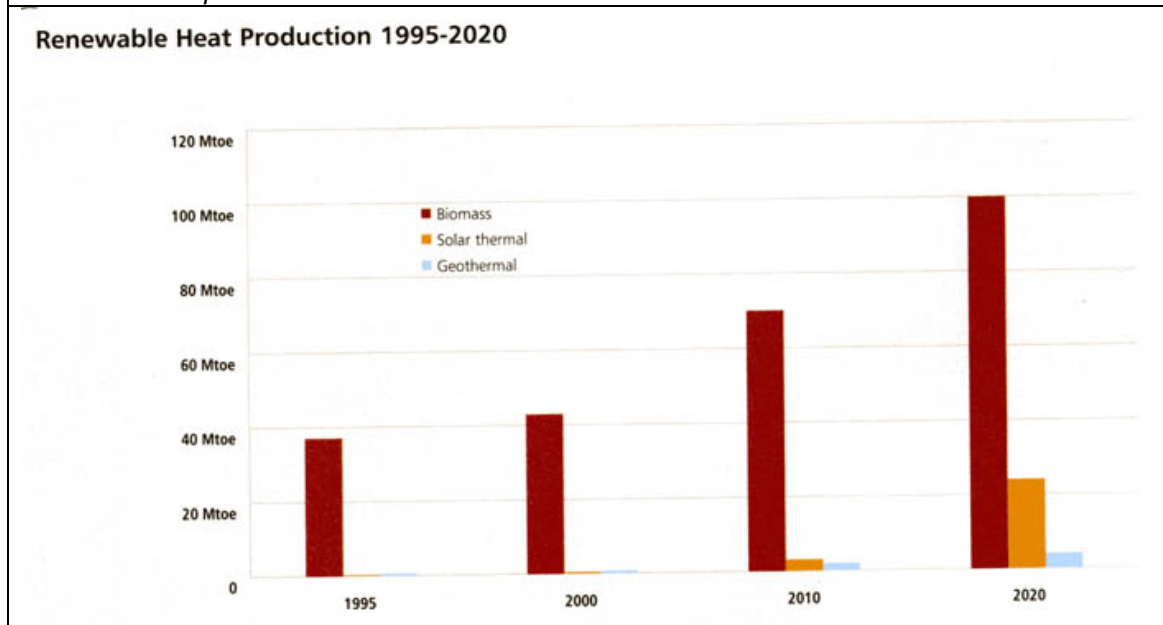
⁴⁷ 1 364,5 Mtep des 10 038,3 Mtep consommés dans le monde sont d'origine renouvelable. D'après IIASA.

En 2001 **en Europe**, la part des énergies renouvelables dans la consommation intérieure brute (CIB) est de 6 %. Le 24 septembre 2005, le Parlement européen a adopté une résolution qui fixe un objectif contraignant de **20% d'énergies renouvelables d'ici 2020**. Cet objectif s'appuie sur un scénario qui prévoit la part d'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables (**E-SER**) de **33%** et une contribution de **25% dans la production de chaleur en 2020**.^{48 49}

Et plus récemment, lors du sommet de Bruxelles du 24 mars 2006, le Conseil européen s'est donné un objectif de **15% d'énergies renouvelables en 2015**.



Evolution de la production E-SER⁵⁰



Evolution de la production C-SER⁵¹

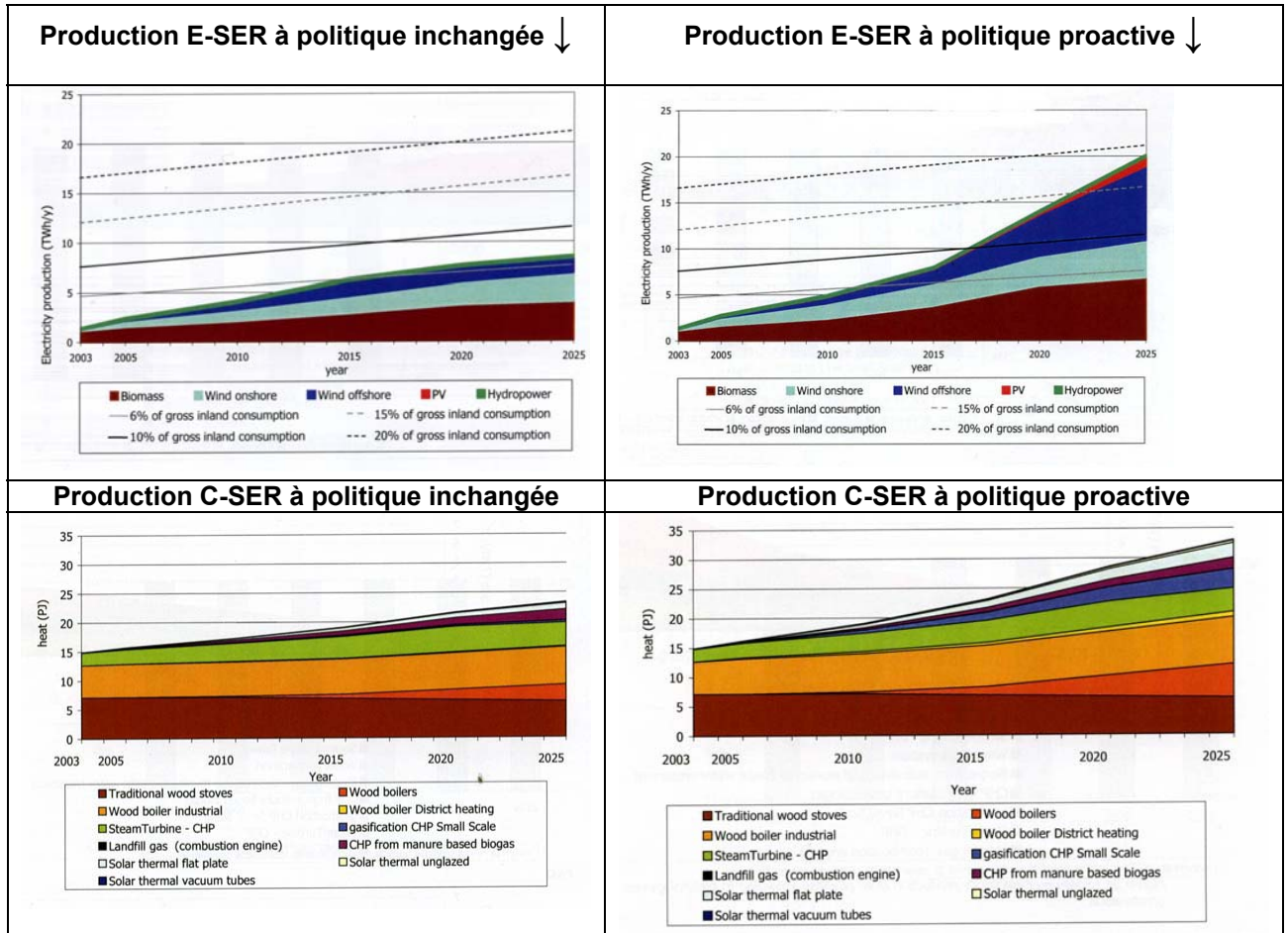
⁴⁸ « Renewables energy Target for Europe – 20% by 2020 » EREC – www.erec-renewables.org

⁴⁹ En 2000, la part d'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables (E-SER) était de 15,1% et une contribution de 9,7% dans la production de chaleur

⁵⁰ « Renewables energy Target for Europe – 20% by 2020 » EREC – www.erec-renewables.org

⁵¹ « Renewables energy Target for Europe – 20% by 2020 » EREC – www.erec-renewables.org

En Belgique aussi nous assistons à un accroissement de la production à partir de sources renouvelables. Ainsi en Wallonie, le mécanisme de marché des certificats verts a été conçu sur base d'une **croissance annuelle de 1 à 3% de la part des sources renouvelables dans la production d'électricité**. Instauré en 2003, il est jusqu'à présent en équilibre et la CWaPE prévoit une part de 8,5 à 12 % en 2010 sur base de projets concrets.⁵²



« Solar roadmap » 2004⁵³ pour la Politique Scientifique Fédérale Belge

L'étude « Solar roadmap », commanditée par la Politique Scientifique Fédérale Belge, analyse pour la Belgique deux scénarios de développement des énergies renouvelables d'ici 2025. Selon que l'on se base sur un scénario à politique inchangée ou à une politique proactive, l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables (E-SER) se situe entre 8 et 18% et la production de chaleur d'origine renouvelable augmente d'un facteur 1,6 à 2,2 entre 2003 et 2025.

⁵² Proposition du 11/07/2005 sur « les nouveaux quotas applicables à partir du 1^{er} janvier 2008 » - www.cwape.be

⁵³ 3^E, IMEC, Fondation Universitaire Luxembourgeoise et l'Unité TERM de UCL ; Juin 2004

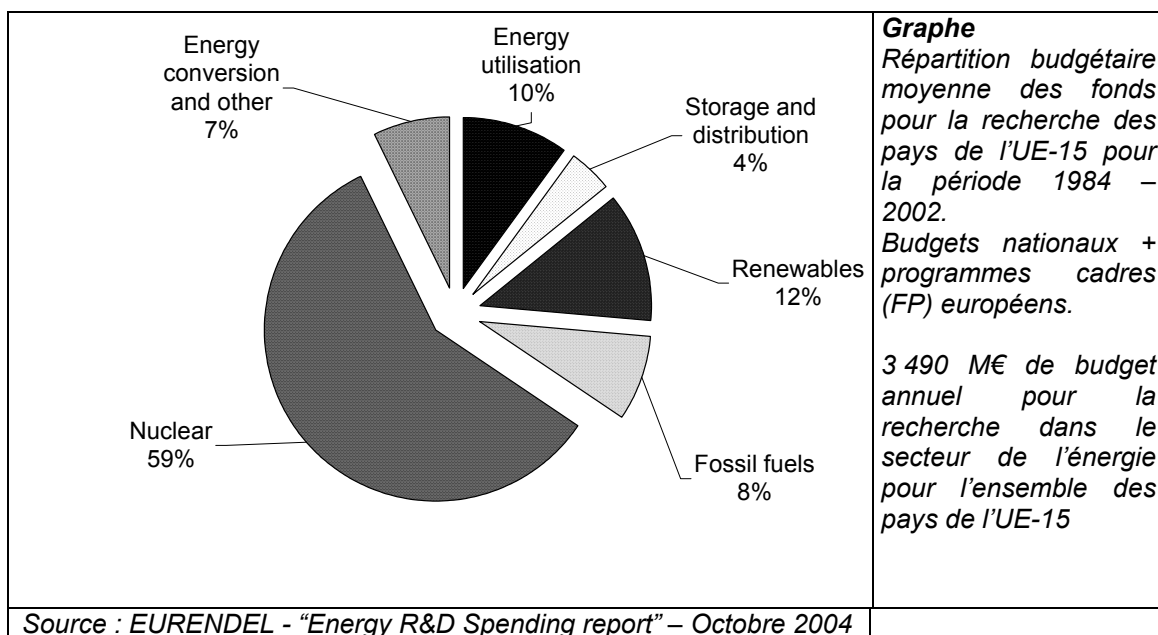
Evolution technologique des énergies renouvelables et opportunités de recherche et développement

Budgets pour la recherche

Les autorités publiques ont la responsabilité de donner un signal clair et fort aux industries et aux chercheurs pour stimuler l'innovation technologique nécessaire à la transition de l'ère du pétrole à l'ère des énergies renouvelables.

En 1997, la Commission Européenne annonçait sa volonté de doubler la part des énergies renouvelables de la consommation intérieure brute (CIB) pour atteindre 12% en 2010.⁵⁴

Aujourd'hui, le Parlement européen demande des objectifs contraignants pour les Etats membres pour un objectif global européen de 20% en 2020.⁵⁵



Cette volonté politique devrait se traduire par l'attribution appropriée des moyens budgétaires pour la recherche. Comme le montre la répartition budgétaire pour les pays de l'UE-15; de 1984 à 2002, les énergies renouvelables n'ont bénéficié que de 12% des budgets recherche attribués à l'énergie (7 703 M€ sur 62 828 M€). Notons que la contribution moyenne des Gouvernements des 15 Etats membres est de $\frac{3}{4}$ et la part des programmes cadres de recherche de la Commission européenne est de $\frac{1}{4}$.

Depuis 2002, on observe une croissance des crédits accordés aux énergies renouvelables. Par son communiqué du 1^{er} mars 2005, EREC et EUREC⁵⁶ attendent du 7^{ème} programme cadre (FP7) un budget annuel d'au moins 250 M€ pour la période de 2007-2010 pour les énergies renouvelables.⁵⁷

⁵⁴ Livre Blanc COM (97)599 établissant une stratégie et un plan d'action communautaire pour les sources d'énergie renouvelables.

⁵⁵ Résolution du PE sur la part des SER dans l'UE et les propositions d'actions concrètes. (2004/2153). Strasbourg 29 septembre 2005.

⁵⁶ European Association of Renewable Energy Research Centers – www.eurec.be

⁵⁷ Les trois derniers programmes cadres (FP) de recherche de l'Union européenne ont consacré approximativement 90 à 110 millions d'EUR par an pour l'énergie durable (sustainable energy) c'est-à-dire les énergies renouvelables et l'URE

Evolution technologiques observées ou attendues dans le domaine des énergies renouvelables

Pour atteindre les objectifs annoncés, le secteur de la recherche et de l'industrie des énergies renouvelables comptent sur les autorités publiques qu'elles soient régionales, nationales ou européennes pour les accompagner dans cette démarche. Les fruits des programmes de recherche permettront l'amélioration des systèmes actuels et l'émergence de nouvelles solutions.

Sur base de l'étude d'EUREC « FP7 Research Priorities for Renewable Energy Sector » de mars 2005 et de l'analyse pour la Belgique de l'APERe⁵⁸ et de EDORA⁵⁹, nous présentons ci-après de manière non exhaustive, des évolutions technologiques remarquables et des priorités de recherche par filière des énergies renouvelables.



Biomasse-énergie

Bois-énergie, biométhanisation et biocarburant ont un grand potentiel de développement dont l'objectif européen est d'avoir une production primaire de 135 Mtep en 2010.⁶⁰

L'industrie du **bois-énergie** est particulièrement dynamique sur le plan des technologies. Les chaudières vendues sur le marché ont des rendements de plus en plus élevés et les gammes de produits sont de plus en plus spécifiques en terme de puissances et de combustibles. Mais outre les technologies de conversion énergétique, le secteur a fortement amélioré le matériel de manutention et de récolte du bois, la qualité des biocombustibles et la logistique permettant de les acheminer vers les lieux de consommation. Ainsi l'Europe observe une augmentation annuelle de 6% de la production primaire (55,4 Mtep en 2004) et de 23% de la production d'électricité à partir de bois (35 TWh en 2004).⁶¹

La **production de biogaz** est généralement le produit du traitement de déchets (déchets ménagers, sous-produits agricoles). Aujourd'hui, la production d'électricité et la cogénération remplacent la simple valorisation thermique et des projets pilotes visent son utilisation comme carburant ou l'injection dans le réseau du gaz naturel. En 2004, 4,3 Mtep de biogaz ont été produits en Europe et l'objectif européen est de 15 Mtep en 2010.⁶²

Parmi les **biocarburants** qui sont techniquement au point, on distingue trois grandes filières : l'**huile végétale pure** issue de graines oléagineuses, le **biodiesel** issu de la transformation de l'huile végétale et l'**éthanol** issu de la fermentation de sucres ou d'amidon. Par ailleurs, des recherches prometteuses visent le développement d'autres biocarburants à partir de sources ligno-cellulosiques (bois, paille, sous-produits forestiers). La Commission européenne a fixé pour 2010 un minimum de 5,75% de biocarburants du marché à des ventes de carburants à des fins de transport⁶³. Cela équivaldrait en 2010 à une quantité de 18 Mtep. En 2004, la production européenne se situe à 2,4 Mtep.⁶⁴

⁵⁸ Association pour la Promotion des Energies Renouvelable – www.apere.org

⁵⁹ Fédération de l'électricité d'origine renouvelables et alternative – www.edora.be

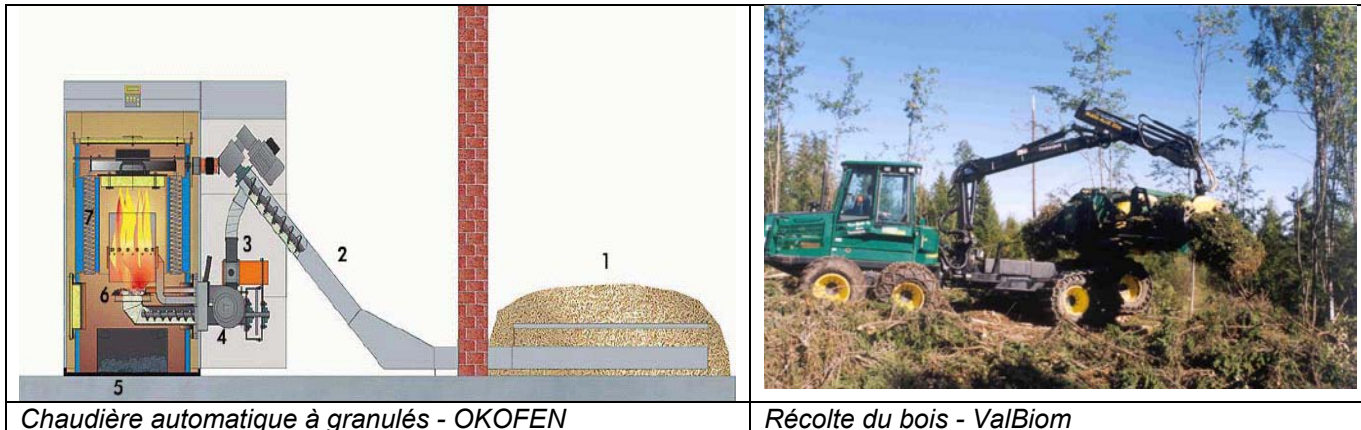
⁶⁰ Livre Blanc COM (97)599

⁶¹ Baromètre du bois-énergie, octobre 2005 – EurObserv'ER

⁶² Baromètre du biogaz, juin 2005 – EurObserv'ER

⁶³ Directive visant à promouvoir l'utilisation des biocarburants - DIR 2003/30/CE du 8 mai 2003

⁶⁴ Baromètre des biocarburants, juin 2005 – EurObserv'ER



Chaudière automatique à granulés - OKOFEN

Récolte du bois - ValBiom

- Matériels de manutention et de récolte en forêt et de conditionnement, de livraison et de stockage du biocombustible
- Cultures énergétiques (Taillis à très courte rotation)
- Normalisation des biocombustibles et des méthodes de mesure du rendement
- Systèmes de commercialisation et de stockage de la biomasse solide (pellets ou granulés de bois, plaquettes, grains, paille)
- Equipements de combustion performants (augmentation du rendement énergétique, diminution des émissions, cogénération, alimentation automatisée)
- Production d'éthanol ou d'hydrogène à partir de ressources ligneuses
- Maîtrise de la biométhanisation et des méthodes de traitement du biogaz pour des applications comme carburant ou l'injection dans le réseau
- Déploiement harmonieux des biocarburants (cultures énergétiques, transformation, distribution, moteurs à combustion) et analyse environnementale de la filière
- Biocarburants issu de sources ligno-cellulosiques
- Réglementation sur l'importation de la biomasse-énergie

Eolien

Le marché de l'industrie éolienne présente une croissance annuelle de 35% depuis 1990 et les développements technologiques ont permis de disposer d'une technologie de pointe aux dimensions impressionnantes avec des rotors qui atteignent 126 mètres de diamètre et des puissances unitaires de 6 MW. En 2004, 5 700 MW ont été installés en Europe pour une puissance cumulée d'un peu moins de 35 000 MW.⁶⁵



Entretien parc éolien offshore - Vestas



Atelier de fabrication de génératrices multipolaires pour éoliennes - Enercon

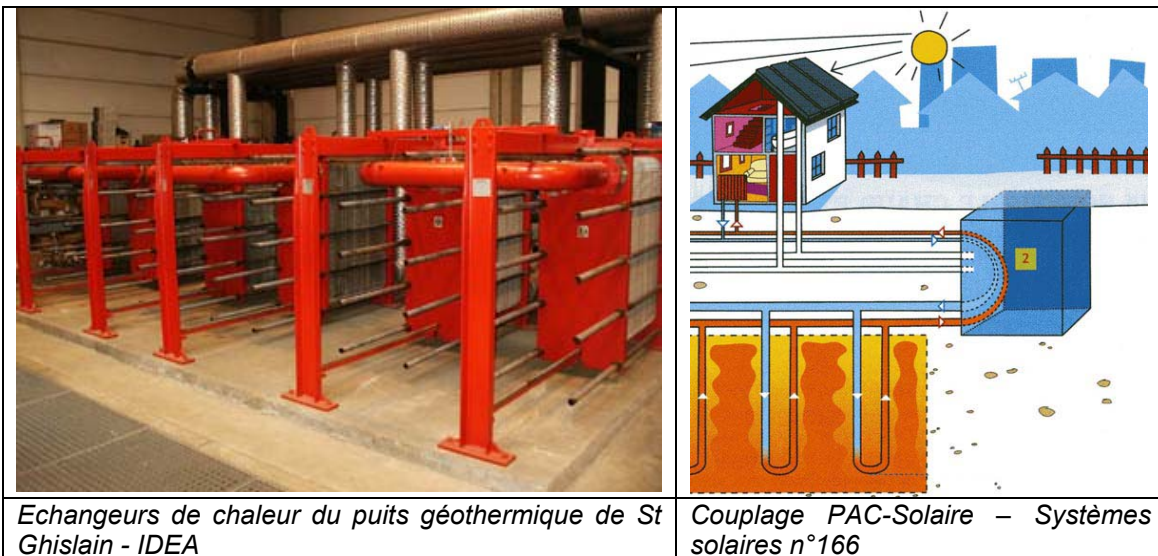
⁶⁵ www.ewea.org

- Eléments constitutifs des éoliennes (augmentation de la taille des rotors et des mâts, dessins aérodynamiques, génératrices à faible vitesse de rotation, nouveaux concepts)
- Adaptation des éoliennes pour des milieux complexes (zones à faible vent, zones à forte turbulence, zones à climat extrême, offshore)
- Nouveaux matériaux pour alléger les structures et accroître la résistance
- Intégration de la production électrique éolienne dans le réseau électrique
- Systèmes hybrides couplé avec l'éolien pour sites isolés
- Systèmes de prédiction de la production éolienne
- Systèmes d'évaluation du potentiel énergétique de sites
- Parcs éoliens offshore (planification de l'implantation des éoliennes, organisation de la maintenance, fondations en milieu marin)
- Analyse socio-économique et environnementale du développement de parcs éoliens (aspects juridiques de l'exploitation de la ressource, intégration paysagère, Life Cycle Analysis)

Géothermie et chaleur naturelle

Un des avantages de la géothermie est la non influence des saisons et des facteurs extérieurs sur la disponibilité de la ressource thermique. En Europe, la recherche s'intéresse particulièrement à l'exploitation des zones rocheuses fracturées à haute température située à des profondeurs de l'ordre de 5 000 mètres. Cependant la géothermie belge s'oriente vers l'exploitation de zones à faible et moyenne température. En Belgique, 3 sites sont exploités.⁶⁶

Pour l'exploitation de sources chaudes de basse température (0 à 30°C), la pompe à chaleur (PAC) est une technologie intéressante. La technologie s'apparente plus à celle des frigoristes que des chauffagistes et la maîtrise des échanges thermiques est essentielle pour une bonne installation.

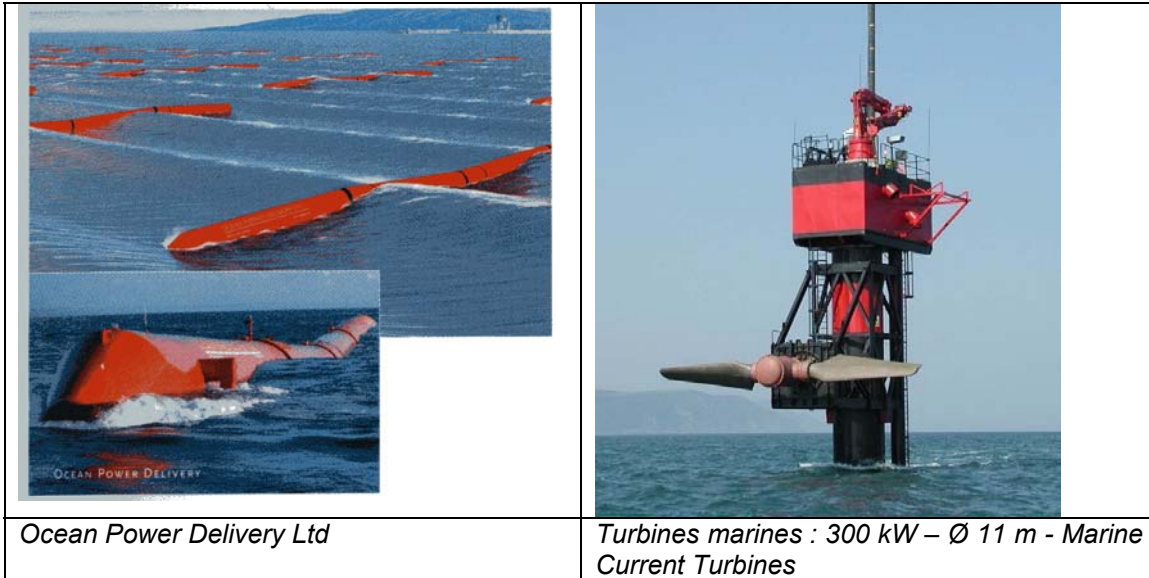


- Amélioration des connaissances sur l'évaluation de la ressource géothermique, l'acquisition de données géologique et la simulation thermique
- Maîtrise des technologies de forage et d'intégration des éléments d'exploitation géothermique
- Recherche appliquée sur le couplage du solaire thermique et des pompes à chaleur combiné à un stockage dans le sol
- Utilisation de compresseurs à vitesses variables pour les pompes à chaleur (PAC)
- Maîtrise de l'efficacité des échangeurs de chaleur pour le condenseur et surtout l'évaporateur d'une PAC
- Maîtrise de la régulation des PAC
- Fluides frigorigènes des PAC (remplacement)

⁶⁶ Saint-Ghislain (76°C), Douvrain (67°C) et Turnhout (34°C)

Mers et océans

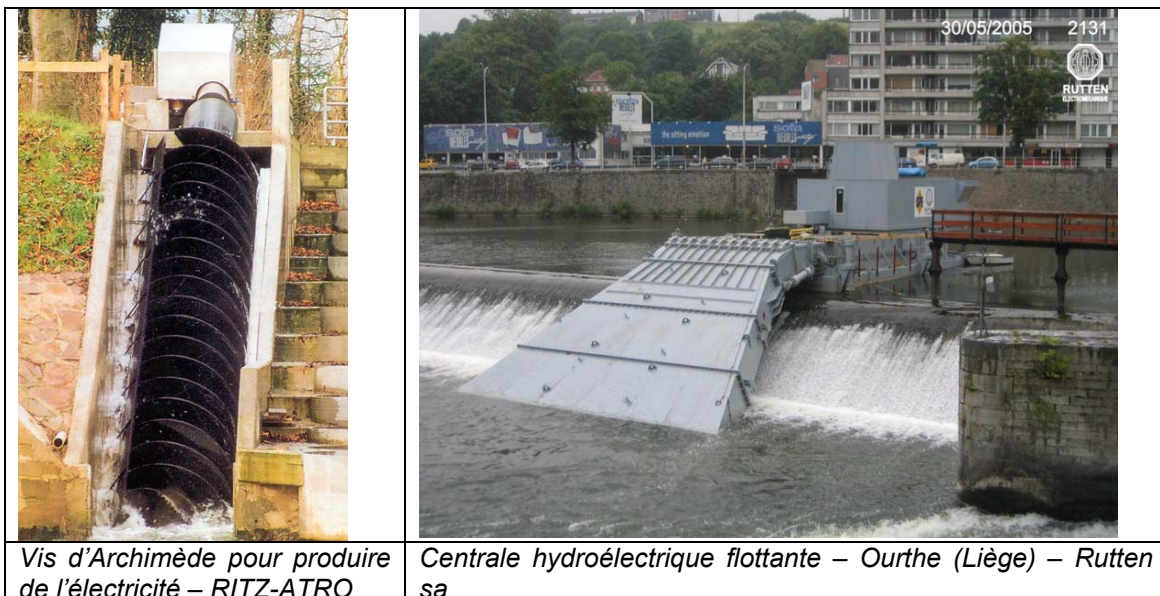
71% de la surface terrestre est couverte par les mers et les océans. Les vagues, marées, courants et gradients thermiques représentent un potentiel énergétique gigantesque. Les domaines de recherche sont étendus et ils concernent les aspects environnementaux, la transformation de la ressource, la gestion des équipements et la connexion au réseau électrique en milieu marin. Les résultats des recherches sont encourageants, mais à ce jour, il n'y a pas encore d'émergence de solutions qui dépasse l'étape du prototype.



- Développement de nouveaux prototypes et d'unités de démonstration.
- Analyse de l'impact sur le milieu marin
- Système de gestion et de maintenance des installations en milieu marin
- Couplage avec parcs éoliens offshore

Petite hydroélectricité

Bien que l'hydroélectricité soit une technologie mûre, le développement de nouvelles idées est encore attendu surtout dans le domaine des centrales au fil de l'eau et de la maîtrise objective des impacts sur les écosystèmes aquatiques. Du point de vue des turbines, le développement concerne tout particulièrement les basses chutes.



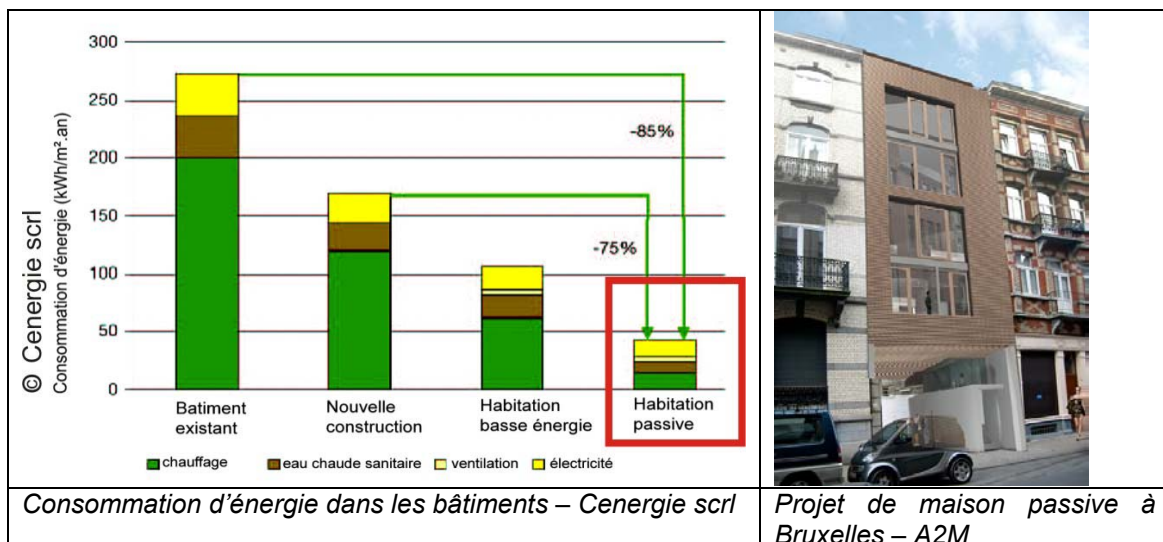
- Turbines basse chute
- Génératrices électriques à faible vitesse de rotation adaptées à l'hydroélectricité
- Turbogénérateurs submersibles
- Centrales hydroélectriques flottantes
- Règles d'exploitation basée sur une gestion objective des débits réservés à la rivière

Solaire passif ou architecture climatique et bâtiments énergétiquement performants

Le chauffage et la réfrigération des bâtiments représentent des dépenses énergétiques importantes dans les bâtiments⁶⁷. L'amélioration des performances énergétiques des bâtiments offre des possibilités de réduction des consommations considérables : Le potentiel d'économie attendu par la mise en application de la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments⁶⁸ est estimé à 22% à l'échéance 2010.

Pour autant que l'enveloppe du bâtiment soit correctement réalisée, la conception climatique et l'intégration de systèmes énergétiques exploitant des sources renouvelables (soleil, bois et chaleur naturelle) peuvent couvrir l'ensemble des besoins énergétiques des bâtiments.

En Belgique, les maisons passives permettent de maintenir un confort pour ses occupants sans chauffage central. Elles combinent (1) haut niveau d'isolation ($K < 15$), (2) étanchéité à l'air et (3) ventilation mécanique avec échangeur de chaleur air/air à haute efficacité.



- Intégration architecturale des systèmes de gestion de l'énergie et d'applications solaires (systèmes solaires actifs, éclairage et ventilation naturelle, pompe à chaleur)
- Microcogénération dans l'habitat
- Matériaux d'isolation et d'étanchéité ainsi que les techniques de mise en œuvre
- Maisons passives et Maisons « Energie + »

Solaire thermique et réfrigération solaire

Les capteurs thermiques actuels sont de haute qualité (résistance) et ils ont des hauts rendements de conversion (lumière → chaleur) dans les conditions climatiques belges. Les éléments de développement visent à améliorer les performances des systèmes complets (capteur, circuit de transfert thermique, réservoir, régulation et couplage avec le système

⁶⁷ En Wallonie, 3/4 des consommations énergétiques dans le logement servent au chauffage et le secteur résidentiel représente 25% de la consommation énergétique totale. Source : <http://energie.wallonie.be>
En Europe, 52 à 57% des consommations énergétiques des bâtiments servent au chauffage et les secteurs résidentiel et tertiaire concernent 41% de la consommation finale en 2000. Source ; DG TREN de la Commission Européenne

⁶⁸ DIR 2002/91/CE du 16 décembre 2002 – JO 4 janvier 2003

d'appoint). Un autre axe de développement considérable est la réfrigération solaire pour la production de froid et la climatisation.

Rappelons que fin 2003, plus de 14 millions de m² de capteurs thermiques étaient installés en Europe dont l'Allemagne est le pays leader. L'objectif européen est d'atteindre 100 millions de m² en 2010.⁶⁹



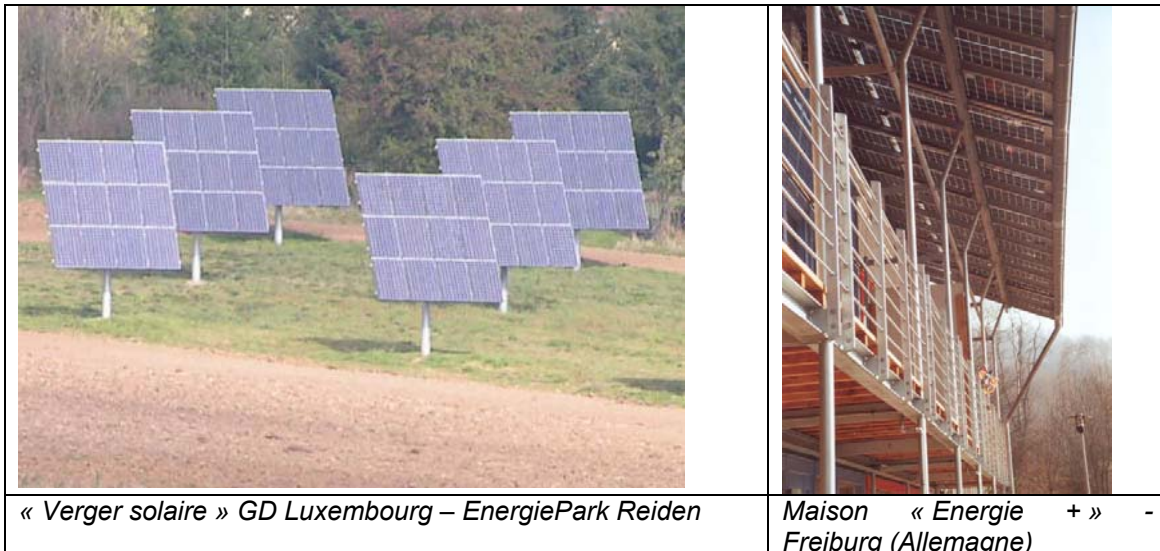
- Conception de systèmes s'intégrant dans l'habitat (capteur, transfert de chaleur et réservoir) de petites et grandes tailles
- Systèmes combinés : chauffage du bâtiment et de l'eau sanitaire
- Intégration architecturale
- Systèmes de régulation thermique et systèmes de mesure de la production solaire
- Stockage thermique et chimique améliorant l'efficacité quotidienne et permettant une redistribution saisonnière
- Systèmes combinant production de chaleur et d'électricité photovoltaïque
- Capteurs thermiques à haute température pour les applications de froid solaire et de désalinisation de saumures
- Systèmes de réfrigération solaire (Cycles thermodynamiques)

Solaire photovoltaïque

L'énergie solaire est sans conteste la source la plus importante et la mieux répartie. La production solaire photovoltaïque aura à long terme une place considérable dans la production décentralisée d'électricité. Ces 10 dernières années, le taux de croissance moyen annuel mondial est de 35,5% essentiellement couvert par les industries japonaises (52%), européennes (26%, principalement allemandes) et américaines (11%).⁷⁰ Fin 2004, la puissance installée en UE a atteint 1GW_c correspondant à une surface installée de 10 km². Du côté des cellules photovoltaïques, des rendements de conversion de 35% ont été atteints en 2005 grâce à des cellules à triple jonction au germanium couplé à des systèmes de concentration de 300 soleils.

⁶⁹ EurObserv'ER

⁷⁰ Barometre du solaire photovoltaïque, avril 2005 – EurObserv'ER

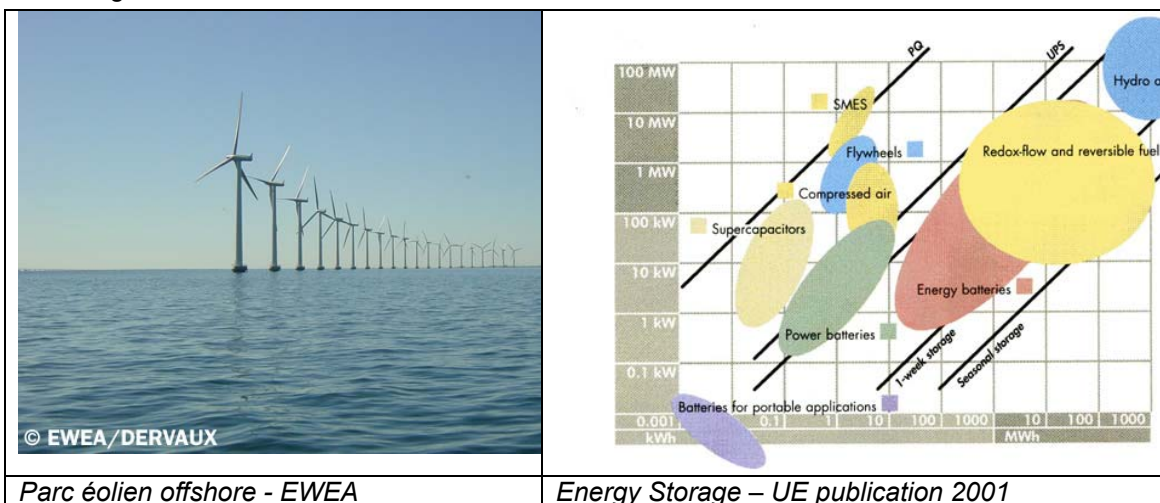


- Technologies de fabrication des cellules à silicium cristallin permettant de réduire les coûts de fabrication et d'augmenter la productivité
- Systèmes de production de silicium cristallin de qualité photovoltaïque
- Technologies des couches minces
- Nouvelles cellules sur substrats organiques
- Pour les régions à haut ensoleillement direct, systèmes de concentration du rayonnement solaire
- Intégration architecturale des systèmes photovoltaïques
- Systèmes de conversion (onduleur), de connexion au réseau et systèmes de stockage
- Système hybride couplant la production solaire photovoltaïque à une autre ressource énergétique

Intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique et petits réseaux électriques isolés

En Europe, la libéralisation des marchés de l'électricité et les objectifs de production d'électricité décentralisée (21% d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables⁷¹ et 18% d'électricité à partir d'unités de cogénération⁷²) motivent l'adaptation des réseaux électriques et la mise en place de systèmes de gestion adaptés.

Les sites isolés peuvent être électrifiés à moindre frais par des systèmes intégrant des énergies renouvelables.



⁷¹ Directive 2001/77/CE relative à la promotion de l'électricité produite à partir de SER sur le marché intérieur de l'électricité. JO du 27/10/2001
⁷² COM(97)514 final

- Systèmes de gestion de réseaux électriques adaptés aux productions décentralisées
- Intégration des grandes productions offshore dans le réseau électrique européen
- Systèmes de gestion de la production éolienne et de prévisions de vent permettant le fonctionnement en toute sécurité de réseaux électriques isolés avec des taux moyen éolien de 35 %
- Systèmes de stockage de l'électricité pour la gestion de l'équilibre du réseau
- Systèmes décentralisés dont l'usage garantit la non perturbation du réseau électrique
- Production électrique couplée à production d'hydrogène
- Systèmes hybrides pour sites isolés
- Stockage de l'énergie avec batteries pour sites isolés

Conclusions

Un des grands défis de notre société du XXI^{ème} siècle est la mise en place d'un service énergétique qui s'inscrit dans un développement soutenable pour l'ensemble de l'humanité. Les énergies renouvelables peuvent y répondre dans la durée et leur intégration est en train de se faire progressivement par des systèmes adaptés à la disponibilité des sources.

Ces dernières années, la production renouvelable est en forte croissance et les résultats de la recherche sont un des moteurs de leur progression. Mais l'enjeu se trouve aussi du côté de la maîtrise de la demande : Les consommateurs privilégieront les solutions qui engendrent la dépense énergétique la plus petite.

Les énergies renouvelables démontrent aujourd'hui leur capacité à contribuer efficacement au service énergétique de notre société. La diversité des sources renouvelables va de pair avec la diversité des solutions mises en œuvre ou à développer. Dans ce contexte, le rôle de l'ingénieur est primordial, mais au-delà de la technique, c'est à un nouveau rapport à l'énergie à laquelle la société est confrontée et tout changement culturel nécessite un long travail d'adaptation. Il est important de s'y investir dès à présent.