

TRAVAIL DE MATURITE

# Après Fukushima

---

Peut-on remplacer le nucléaire par la biomasse  
en Suisse et dans quelle mesure?



Lucie Fiore – Collège St-Michel – 3E5Z

18/03/2013

## Table des matières

0. Introduction .....	3
1. 1 <sup>e</sup> partie : La Biomasse .....	5
1.1. Définition .....	5
1.2. Les différents agents énergétiques produits à partir de la biomasse .....	5
1.2.1. Le biogaz .....	5
1.2.1.1. Le procédé : la méthanisation.....	6
1.2.1.2. Les substrats : l'alimentation.....	7
1.2.1.3. Conditions requises pour une méthanisation optimale .....	12
1.2.1.4. Les différents types de production.....	14
1.2.1.5. Les différentes étapes de la production.....	15
1.2.1.6. L'utilisation.....	15
1.2.1.7. L'état actuel et le potentiel.....	16
1.2.1.7.1. Au niveau mondial.....	16
1.2.1.7.2. Au niveau suisse .....	16
1.2.2. Les agro carburants .....	18
1.2.2.1. Les différentes sortes d'agro carburants .....	19
1.2.2.1.1. Les biocarburants issus des plantes oléagineuses .....	19
1.2.2.1.2. Les biocarburants basés sur l'alcool.....	20
1.2.2.1.3. Le biogaz comme biocarburant .....	21
1.2.2.1.4. L'intérêt des biocarburants.....	21
1.2.2.1.5. L'état actuel, le potentiel et les limites du renouvelable .....	22
1.2.3. Le bois : la biomasse solide .....	24
1.2.3.1. Les différents combustibles.....	24
1.2.3.2. L'utilisation.....	25
1.2.3.3. L'état actuel et le potentiel.....	26
1.2.3.3.1. Au niveau suisse.....	26
2. 2 <sup>e</sup> partie : intégration de la biomasse dans la politique énergétique Suisse et intégration européenne .....	28
2.1. L'énergie dans le monde.....	28
2.2. Une fin pour le nucléaire.....	29

2.2.1.L'état actuel .....	29
2.2.1.1.La production mondiale .....	29
2.2.1.2.La production suisse .....	30
2.2.2.La remise en cause du nucléaire.....	32
2.2.3.La sortie définitive du nucléaire de la Suisse.....	33
2.3.La révolution énergétique par le renouvelable.....	34
2.3.1. Les énergies renouvelables.....	34
2.3.1.1.Les différents types d'énergies renouvelables.....	34
2.3.1.2.La part et la croissance des énergies renouvelables.....	35
2.4. La biomasse.....	39
2.4.1. La part et la croissance de la biomasse .....	39
3.4.1.1.Au niveau mondial .....	39
3.4.1.2.Au niveau suisse.....	39
2.4.2. Aspects environnementaux.....	41
2.4.2.1.Aspects économiques.....	42
3. Bilan et conclusion.....	44
4. Annexes .....	46
Annexe 1 : unités de mesure.....	46
Annexe 2 : compte rendu de la visite de biogaz agricole de Villorsonens, Suisse.....	47
5. Bibliographie.....	48

## 0. Introduction

L'accident nucléaire survenu en mars 2011 à Fukushima a conduit de nombreux pays dans le monde entier à repenser leur choix quant à la production du nucléaire et par conséquence leur programme énergétique. C'est ainsi que, comme plusieurs de leurs voisins européens, les autorités suisses ont pris la décision de sortir du nucléaire d'ici 2034.

En parallèle à cette lutte contre le nucléaire est mené un combat visant à se détacher des énergies fossiles, ces dernières tendant à s'épuiser. Notre société semblant plus attentive à la sauvegarde de la planète, plus soucieuse de l'écologie, elle abandonne ou tente de se détacher des énergies fossiles.

Une sortie du nucléaire et des énergies fossiles implique un remplacement de ces ressources d'énergies par une ou plusieurs autres énergies capables de garder les avantages des précédentes et de combler leurs déficits. Malgré son manque de sûreté et ses déchets non-négligeables, le nucléaire est neutre en CO<sub>2</sub> et est extrêmement efficace, avec un rendement énorme. On attend donc de cette énergie de substitution qu'elle soit efficace, neutre en CO<sub>2</sub> et que ses réserves soient inépuisables. En outre, on exige de cette énergie de remplacement qu'elle réponde à l'éthique et qu'elle soit économiquement accessible. Bien entendu, trouver une énergie renouvelable permettrait d'assurer un avenir énergétique aux générations futures.

Le monde actuel consomme toujours plus et consommera encore d'avantage : une grande partie de la population n'a pas accès à l'électricité (forme principale de l'énergie) et ne demande qu'à être reliée au réseau. Se détacher du nucléaire et des énergies fossiles, sources majeures de production, alors que la demande croît constamment, peut donc paraître inadéquat. C'est pourquoi il faut trouver une solution efficace et réfléchi rapidement, afin d'éviter toute crise ou pénurie.

Beaucoup pensent que les exigences sont trop nombreuses, ne perçoivent cette énergie de remplacement que comme un rêve sans lendemain et voudraient continuer comme nous le faisons en ce moment. Mais ce que certains pensent être une infantile utopie ne pourrait-elle pas devenir un tournant pour l'avenir de l'humanité ?

Pour ce qui est des solutions, l'énergie de remplacement recherchée se trouve sûrement dans les énergies renouvelables. Avec leurs ressources inépuisables (eau, vent, soleil, végétation) et leur faible rejet en CO<sub>2</sub>, elles semblent répondre aux besoins. Afin de juger quelle est l'énergie renouvelable la plus adéquate pour remplacer le nucléaire et assurer un futur énergétique à la Suisse, il est important d'en savoir plus sur ces énergies.

Parmi les options à l'étude, la biomasse, produite à partir de végétaux, pourrait être une l'énergie de remplacement. Pays très vert, où la nature prime, la Suisse pourrait voir son énergie se produire de plus en plus à partir de la végétation locale. Il est nécessaire d'analyser cette énergie, sa nature, les différents aspects sous lesquelles elle se décline, sa production, comprendre si elle est adaptable au niveau suisse, si elle répond aux diverses exigences requises.

Etre dépendant d'une seule et unique énergie reste quasi-impossible et serait prendre de gros risques. La solution se trouve probablement dans une combinaison de différentes sources d'énergies. Il reste à définir lesquelles et dans quelles proportions.

## 1. 1<sup>e</sup> partie : la biomasse

### 1.1. Définition

La biomasse peut être définie par l'ensemble des matières organiques végétales ou animales pouvant être source d'énergie. Elle se divise en deux grands groupes : la biomasse ligneuse sèche et la biomasse peu ligneuse humide. Ces deux sortes de biomasse se distinguent par leur contenu et par leur procédé de valorisation énergétique.<sup>1</sup>

La biomasse ligneuse sèche correspond à toute matière à base de bois. Elle comprend par exemple le bois de forêt, les taillis, les haies, les arbres fruitiers, les bois de récupération ainsi que les déchets de bois, de l'industrie, de l'artisanat et des ménages. Cette biomasse est transformée en énergie par combustion et gazéification.

La biomasse peu ligneuse humide correspond à toutes autres sortes de matières organiques végétales ou animales pouvant être source d'énergie. On y trouve par exemple de l'engrais de ferme (lisier et fumier), des résidus de récolte, des déchets biogènes de l'industrie alimentaire et des ménages, etc. Le procédé de valorisation énergétique approprié à la biomasse peu ligneuse humide est la fermentation. Cette biomasse est à la base du biogaz et des agro-carburants.

### 1.2. Les différents agents énergétiques produits à partir de la biomasse

La biomasse est à la base de différents agents énergétiques distincts : le biogaz, les bio-carburants et le bois-énergie.

#### 1.2.1. Le biogaz

D'une manière générale, le biogaz désigne le méthane (CH<sub>4</sub>) issu de la décomposition de matières organiques. La production de biogaz est également appelée méthanisation.

---

<sup>1</sup>Site Office fédéral de l'énergie OFEN

### 1.2.1.1. Le procédé : la méthanisation

La méthanisation est un procédé biologique permettant de valoriser la matière organique, notamment les sous-produits de l'agriculture et de l'industrie agro-alimentaire, par l'action de micro-organismes en l'absence d'oxygène. Ce procédé permet de produire une énergie renouvelable sous forme de biogaz et un digestat, c'est-à-dire l'ensemble des résidus, issus de la méthanisation, qui peut être utilisé comme fertilisant en remplacement des engrais chimiques.

Le processus de méthanisation est découpé en quatre étapes<sup>2</sup>: l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse (figure 1). Des transformations biochimiques permettent de passer d'une étape à une autre du processus de génération du biogaz. Ce processus complexe permet une transformation par fermentation de la biomasse peu ligneuse humide en biogaz. On obtient ainsi environ 70% de méthane et 30% d'hydrogène et de CO<sub>2</sub> (figure 2). On peut également y trouver des traces d'autres gaz comme le NH<sub>3</sub>, le H<sub>2</sub>S, ...

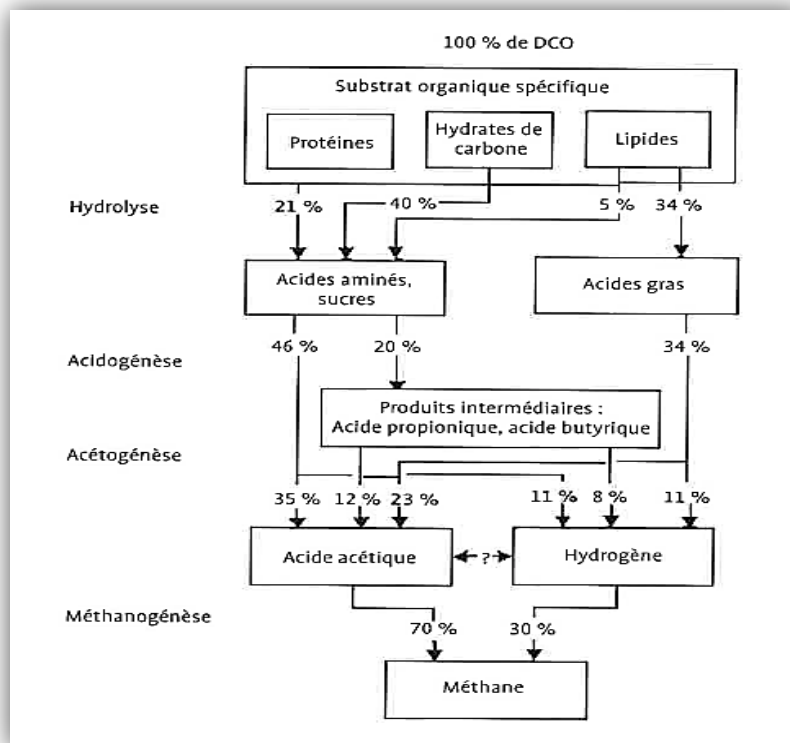


Figure 1 : les quatre étapes du processus de génération de biogaz

<sup>2</sup> Livre *La production de biogaz*, p.20-21

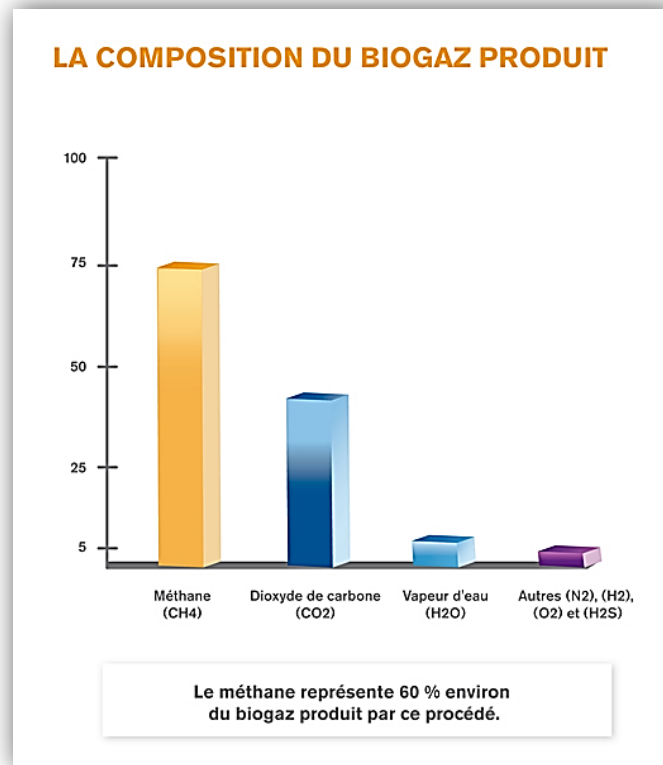


Figure 2 : la composition du biogaz

### 1.2.1.2. Les substrats : l'alimentation

La production de biogaz est alimentée par la biomasse peu ligneuse humide. On désigne sous le terme « substrats » tout ce qui permet d'alimenter la production de biogaz. Tous ces substrats sont des déchets organiques dont les plus intéressants pour faire fonctionner les installations de biogaz sont les suivants :

- les déchets agricoles
- les déchets agroalimentaires
- les déchets issus de l'industrie, de l'artisanat et du commerce
- les déchets ménagers

Les différents substrats n'ont pas le même rendement en gaz après la méthanisation (figure 3). Afin d'évaluer lequel d'entre tous est le plus rentable, il faut comparer le taux de



matière sèche volatile (MSV), c'est-à-dire la substance qui sert à la fermentation, qui est à la base de la production de biogaz, contenue dans les différents affluents d'élevage. Plus le taux de MSV est élevé, plus le rendement est grand et plus le gaz contient de méthane.

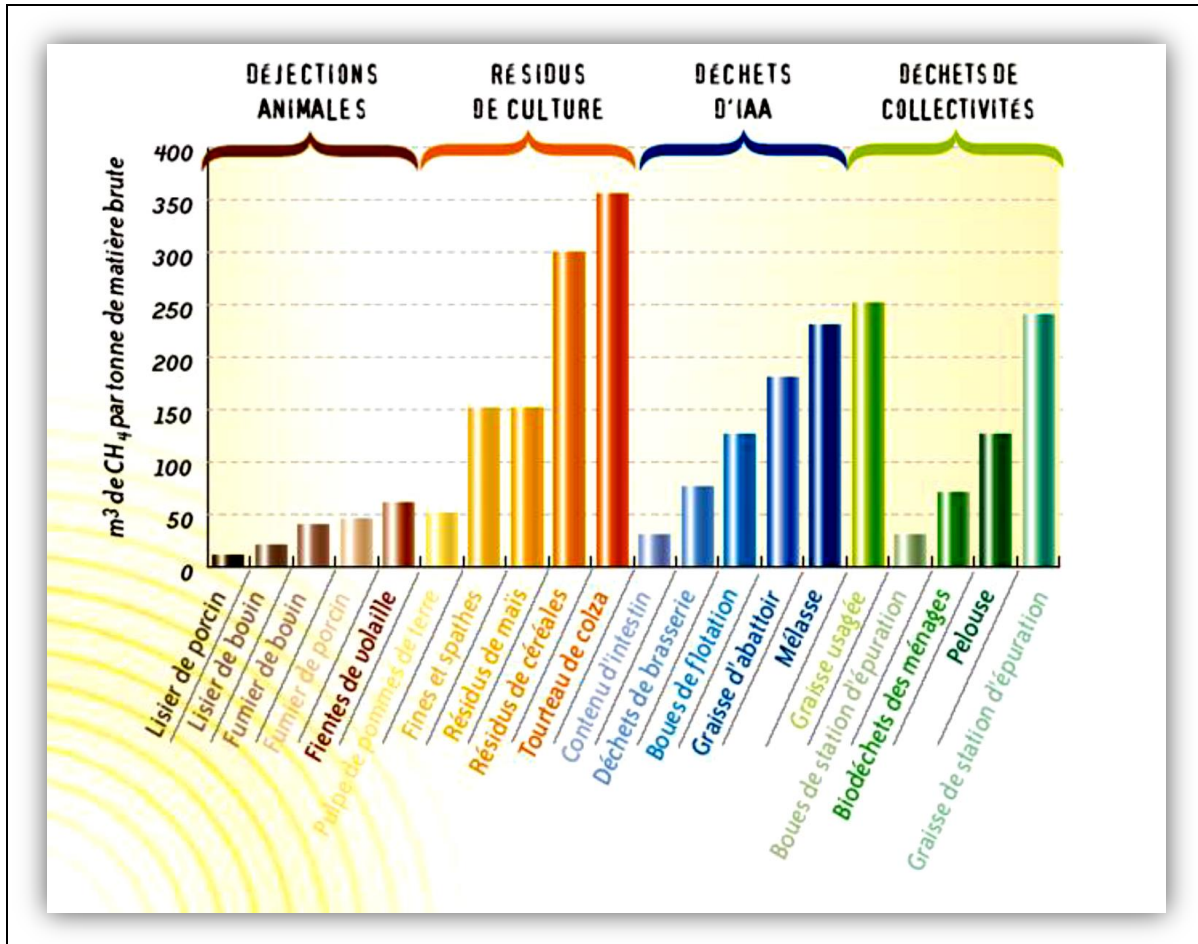


Figure 3 : potentiels méthanogènes des différents substrats

Les déchets agricoles sont principalement constitués de déjections animales (lisier de bovins, de porcs, fiente de volaille) et de déchets de culture (herbe, feuillages, résidus de végétaux, etc...).

Les principaux affluents d'élevage sont le lisier de bovins, lisier de porcs et la fiente de volaille. Pour le lisier de bovins, le taux de MSV est d'environ 82%, le rendement de 20 à 23 m<sup>3</sup> /t de substrat et le gaz produit contient environ 55 à 60% de méthane. Le lisier de porcs, lui, a un taux de MSV d'environ 80%, un rendement en gaz de 22 m<sup>3</sup> /t de substrats environ et

une teneur en méthane d'environ 60%. La fiente de volaille a un taux de MSV qui avoisine les 75%. De par la différence d'exploitation d'élevage des volailles et de par leur alimentation différente, le rendement en gaz peut sensiblement varier : on mesure entre 40 et 160 m<sup>3</sup> de biogaz par tonne de substrat.

Les déchets de cultures agricoles (figure 4) sont un peu plus rentables que le lisier et la fiente. Leur taux de MSV varie de 67 à 98% selon leur nature et leur rendement va de 250 à 650 l/kg de MSV. Dans le même genre de déchet, on trouve la boue des stations d'épuration qui sert elle aussi à produire du biogaz.

<b>Tab. 4. Déchets agricoles – Valeurs indicatives de MS, de MSV et de rendement en gaz</b>			
<b>Déchets Unités</b>	<b>MS (%)</b>	<b>oTS (%)</b>	<b>Rendement en gaz l/kg de MSV</b>
Ensilage d'herbe	26-82	67-98	500-600
Foin	86-93	83-93	500
Trèfle	20	80	500-650
Paille de céréales	85-90	85-89	250-350
Paille de maïs	86	72	500
Feuilles de betteraves	15-18	78-80	400-500
Fanes de pommes de terre	25	79	500-600
Feuillage	85	82	400

Figure 4 : déchets agricoles

On produit aussi du biogaz à partir de déchets issus de l'agro-industrie (figure 5). Ces déchets sont par exemple des résidus de distillation de fruits ou de céréales, du marc de fruits, du marc de café, des déchets de moulins ... Le taux de MSV de ces déchets va de 30 à 98% et le rendement en biogaz varie de 350 à 900 l/kg de MSV. Ces importantes variations sont dues à la différence de nature des déchets.

<b>Tab. 5. Déchets agro-industriels – Valeurs indicatives de MS, de MSV et de rendement en gaz</b>			
<b>Déchets Unités</b>	<b>MS (%)</b>	<b>MSV (%)</b>	<b>Rendement en gaz l/kg de MSV</b>
Résidus de distillation des pommes	2-3,7	94-95	450-500
Résidus de distillation des pommes de terre	12-15	90	430-500
Résidus de distillation du blé	3-5	96-98	400-500
Résidus de distillation de la mélasse	10,5	71,2	400-550
Marc de pommes	25	86	350-550
Marc de fruits	40-50	30-93	450-500
Déchets de brasserie	15-21	66-95	500
Lactosérum	4,3-6,5	80-92	800-900
Déchets de légumes	5-20	76-90	400-600
Plantes médicinales	53	55	400
Résidus de graines d'oléagineux	92	97	600
Tourteaux de colza	88	93	500-600

Figure 5 : déchets agro-industriels

L'industrie, l'artisanat et le commerce produisent de nombreux déchets fermentescibles tel le sang séché, le contenu d'une panse, du pain sec, ... (figure 6). Le taux de MSV de ces déchets est assez élevé : il va de 70 à 99%, alors que leur rendement en gaz varie de 300 à 1400 l/kg de MSV.

**Tab. 6. Déchets produits par l'industrie, l'artisanat et le commerce – valeurs indicatives de MS, de MSV et de rendement en gaz**

Déchets Unités	MS %	MSV %	Rendement en gaz l/kg de MSV
Sang séché	90	80	600
Contenu de l'estomac et des intestins	14	82	450-550
Contenu de la panse	11-19	80-90	300-400
Déchets alimentaires	9-37	75-98	600
Boues de stations d'épuration	5-24	85-98	1200
Matériaux issus de séparateur de graisse	2-70	70-99	1300
Déchets de boulangerie	50	95	1400
Pain sec	90	97	1100
Glycérol pur	99	91	1100

Figure 6 : déchets produits par l'industrie, l'artisanat et le commerce

Les déchets ménagers qui ont été triés et collectés peuvent également être utilisés. Bien qu'ils soient souvent considérés comme déchets secs et donc faisant partie de la biomasse ligneuse sèche, une fois traités, ils participent à la production de biogaz. Leur traitement nécessite un investissement important et reste donc très onéreux, c'est pour cela que seule une petite part des déchets ménagers sert à produire du biogaz. Le rendement oscille entre 90 et 110 m<sup>3</sup> de biogaz par tonne.<sup>3</sup>

Cependant dans la plupart des installations de production, le biogaz n'est pas fabriqué qu'à partir d'une seule sorte de substrats. Le plus souvent, les différents substrats sont mélangés en respectant des proportions précises afin d'obtenir un mélange dont la basicité est neutre, c'est-à-dire qui n'est pas acide, ce qui permet une valorisation optimale (la basicité d'un mélange est calculée en pH sur une échelle d'allant de 1 à 14, une basicité neutre a un pH égal à 7).

<sup>3</sup> Livre *La production de biogaz*, p. 14-16

Le biogaz n'est pas forcément produit à base de déchets, il peut également être le fruit de la valorisation de matières premières renouvelables comme par exemple le maïs dont la culture est dédiée entièrement à la production d'énergie. Le rendement en biogaz des matières premières renouvelables serait le plus intéressant de tous les substrats. Néanmoins l'utilisation de ces ressources cause de nombreux problèmes éthiques : on peut voir l'exploitation de ces matières comme un détournement de leur fonction première, à savoir, d'aliment.

### 1.2.1.3. Conditions requises pour une méthanisation optimale

Le rendement en biogaz dépend donc de la nature du substrat fermenté (composition et teneur en eau), de la durée de fermentation et des conditions de fermentation. En règle générale, la durée totale de fermentation varie entre 60 et 80 jours (fermentation dans le digesteur). Un brassage régulier doit avoir lieu pour homogénéiser le substrat et favoriser la production de biogaz.

C'est principalement la température qui détermine la vitesse de décomposition de la matière : plus elle est élevée dans le digesteur, plus les différents processus biologiques de méthanisation se déroulent rapidement. On distingue trois niveaux de température : la psychrophilie, la mésophilie et la thermophilie (figure 7).

- La psychrophilie est la technique de décomposition de la matière où la température est en dessous de 25°C. Cette méthode n'est plus utilisée de nos jours, car la durée de fermentation est extrêmement longue.
- La mésophilie est la technique de décomposition de la matière à une température comprise entre 25° et 45°C, en général 38°C. A cette température, la durée de fermentation est d'environ 40 jours. La mésophilie est le niveau de température le plus répandu.
- La thermophilie est le niveau de température le plus élevé, entre 45° et 55°. Ce fonctionnement est caractérisé par une décomposition rapide et de hauts rendements en gaz. Or à de telles températures la solution de la méthanisation est

biologiquement moins stable et contient plus d'eau, elle a une basicité plus forte. Cette technique présente d'autres inconvénients : en effet, par rapport à une décomposition à température mésophile, le mélange est beaucoup plus chauffé, nécessitant donc plus d'énergie pour la production.

Afin d'arriver à une production optimale, il est recommandé de mettre en place un procédé en deux temps : d'abord une phase thermophile, puis une phase mésophile. En résumé, l'activité bactérienne est optimale lorsque la température est de 38°C et le pH compris entre 7,5 et 8 (basicité neutre).<sup>4</sup>

Une alimentation du digesteur mal gérée et déséquilibrée peut occasionner un dysfonctionnement du complexe bactérien voire un blocage du digesteur en cas d'acidose, il est donc primordial que le mélange soit neutre (pH = 7).

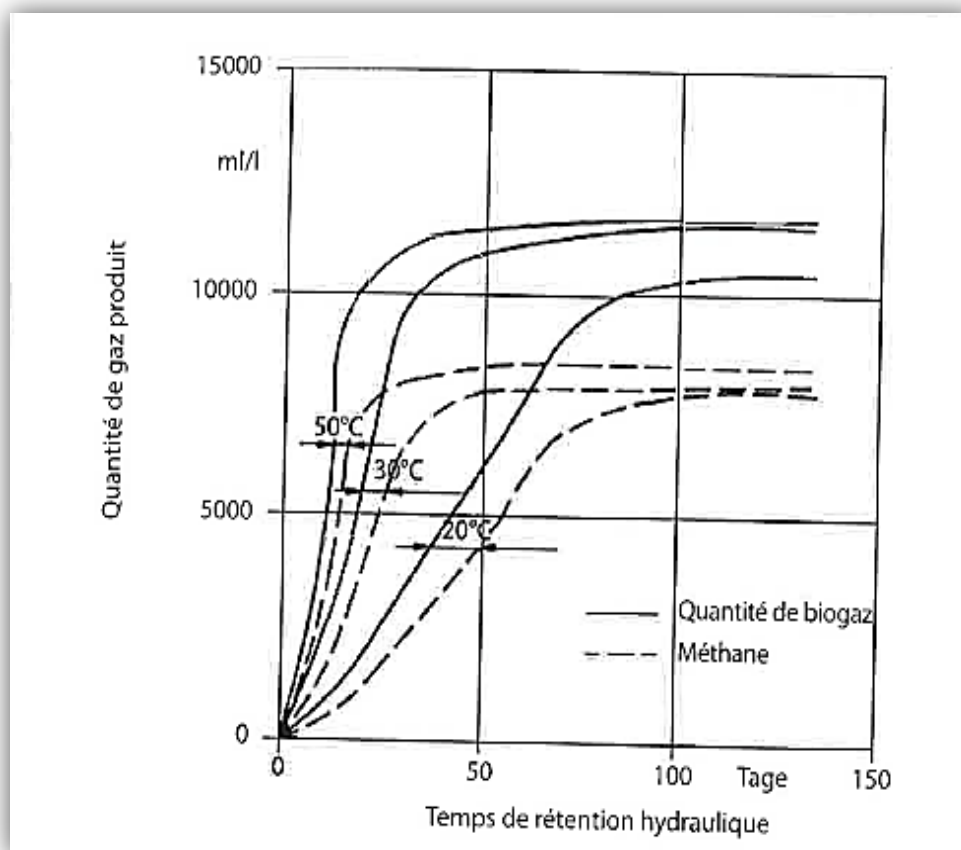


Figure 7 : influence de la température du digesteur sur la méthanisation et la production de biogaz

<sup>4</sup> Livre *La production de biogaz*, p. 27

#### 1.2.1.4. Les différents types de production

Le biogaz est produit dans différents sites : en majorité dans les décharges (également appelées centres d'enfouissement technique) et dans les unités d'épuration des eaux. Mais du biogaz peut également être produit par les établissements agricoles et agroalimentaires, donnant ainsi aux exploitations une alternative à leur activité. La production de biogaz pourrait s'étendre à un plus large public, par exemple aux collectivités ou aux entreprises de toute taille et de toute nature pourvu qu'elles disposent de matières premières nécessaires ; sans oublier les exploitations agricoles pour lesquelles elles représentent également un réel potentiel.

Bien sûr de telles installations de production ont un coût conséquent, c'est pour cela que des regroupements sont à prévoir afin de rentabiliser les équipements. En effet, plus le volume des déchets est important, meilleur est l'amortissement de l'équipement. Il ne faut pas non plus négliger le réseau énergétique, le transport de l'électricité n'étant pas gratuit. Il est donc important de trouver un équilibre entre ces deux facteurs.

On fait une distinction entre les sites de production par rapport à l'endroit où ils se trouvent (production dans les décharges ou production dans les unités d'épuration des eaux, ou production dans les exploitations agricoles ou autres) et par rapport à leur puissance électrique : on parle d'installations agricoles lorsque la centrale de cogénération est d'une puissance électrique comprise entre 50 et 250 kW. Au-delà, on parle d'installations industrielles de l'industrie agricole, de l'industrie alimentaire et de l'économie de déchets. Dans ces cas-là, une puissance électrique installée de 1000 kW (1MW)<sup>5</sup> est tout à fait courante. Les installations de biogaz peuvent produire jusqu'à 3000 kW<sup>6</sup>.

---

<sup>5</sup> Livre *La production de biogaz*, p. 81

<sup>6</sup> Document société 2G KRAFT – WARME – KOPPLUNG AG *Unités de cogénération au biogaz jusqu'à 3.000 kWel*, p.3

### 1.2.1.5. Les différentes étapes de la production<sup>7</sup>

La production de biogaz se découpe en plusieurs étapes (figure 8). Tout d'abord, on mélange dans une pré-fosse les différents substrats. Le mélange est ensuite dirigé vers le digesteur via des conduites d'alimentation. Le biogaz produit est stocké provisoirement dans une bache au-dessus du digesteur en attendant d'être soit injecté directement dans le réseau de gaz naturel, soit converti en courant au moyen d'un couplage chaleur-force. Après la digestion, la matière organique résultante est évacuée du digesteur. Elle est séparée en deux fractions : le digestat solide et le digestat liquide. La fraction solide est compostée tandis que la partie liquide peut être directement utilisée en épandage.

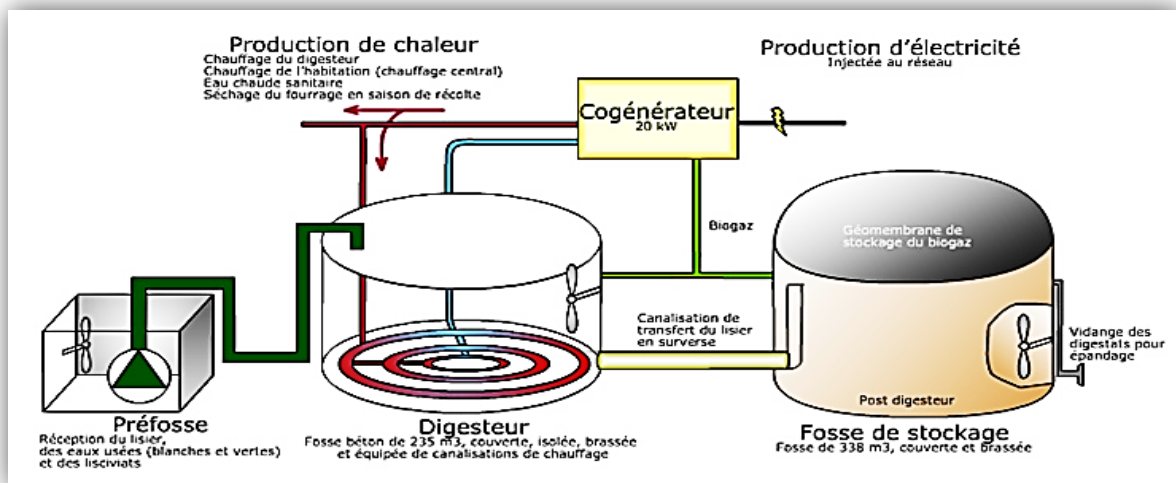


Fig.8 - installation de méthanisation de déchets organiques

### 1.2.1.6. L'utilisation

Au terme de la fermentation des matières organiques, on obtient du biogaz d'un côté et un digestat de l'autre. Ce dernier, après maturation, s'apparente à un compost liquide, plus fluide que du lisier et quasiment inodore. Sa valeur fertilisante étant intéressante (forte proportion d'azote ammoniacal), il peut remplacer partiellement ou en totalité l'engrais minéral.

<sup>7</sup> Site Biomasse Energie



En utilisant un séparateur de phase, il est possible d'obtenir un produit solide qui s'emploie de la même manière qu'un engrais liquide.

Le méthane issu du biogaz est utilisé comme source énergétique dans de nombreuses applications. Certaines d'entre elles sont largement développées et l'offre industrielle et commerciale est solidement établie. Il s'agit notamment de :

- la production de chaleur sous forme d'eau chaude ou de vapeur
- la production d'air chaud pour le séchage
- la production d'électricité par moteur ou turbine à gaz
- la production combinée d'électricité et de chaleur par cogénération

D'autres filières sont en phase de développement, cela concerne principalement la production de biocarburants.

#### 1.2.1.7. L'état actuel et le potentiel

##### 1.2.1.7.1. Au niveau mondial

L'ATEE (Association Technique Energie Environnement) a publié une étude calculant le potentiel théorique mondial du biogaz. Selon elle, il s'élèverait à 750 Mtep/an si tous les déchets organiques étaient méthanisés. A cette valeur il faut rajouter les sous-produits agricoles estimés à 1000 Mtep/an. Au total, le biogaz représenterait un gisement comparable à la consommation mondiale de gaz naturel fossile, soit 1800 Mtep/an. L'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) a fait une étude similaire et elle est arrivée aux mêmes résultats.

##### 1.2.1.7.2. Au niveau suisse

En matière de méthanisation, la Suisse va de l'avant. Des lois et d'autres réglementations incitent à son développement, en particulier dans les secteurs agricole et industriel. En 2010, près de 80 installations agricoles ont vu le jour, plus de 20 sites industriels ainsi que 280 stations d'épuration et une vingtaine d'unités de pré-épuration anaérobie d'affluents in-

dustriels. Chaque année, près de 750 GWh de biogaz sont produits, sous forme d'électricité, de chaleur et de carburant. Une forte incitation au tri collectif, notamment par l'interdiction de la mise en décharge depuis 2002, participe à cet engouement pour la méthanisation.

Le potentiel est considérable : une étude a montré que 300 à 400 installations agricoles seraient susceptibles de développer la méthanisation en Suisse.<sup>8</sup>

Une étude menée en février 2007 par l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT) avec l'Académie suisse des sciences techniques (SATW) prévoit une contribution du biogaz de 5000 GWh quant à l'approvisionnement énergétique de la Suisse pour ce qui est de l'électricité pour 2050. Le biogaz sera un réel concurrent de l'essence. Il contribuait en 2007 à l'approvisionnement national en matière de chaleur avec 600 GWh. Ce taux atteindrait les 5000 GWh d'ici à 2050. Pour ce qui est des carburants, le biogaz aura une place moins importante que dans l'électricité ou la chaleur : d'ici à 2020/2050, seul 1% des véhicules rouleraient au gaz avec biogaz.<sup>9</sup>

De même, un autre rapport de la SATW, intitulé «Plan de route - Energies renouvelables Suisse» datant de 2006, donne le potentiel de production d'électricité renouvelable pour 2050 ainsi que ses coûts. Le graphique ci-dessous montre l'évolution de ces grandeurs (figure 9). On constate alors qu'en 2050, le prix de l'électricité renouvelable produite à partir de technologie fiable sera compris entre 6 et 14 cts/kWh, alors qu'il se situait au moment de l'enquête entre 6 et 79 cts/kWh. Le biogaz, coûtant 17,6 centimes en 2006 ne serait plus qu'à 12 cts/kWh en 2050.<sup>10</sup>

---

<sup>8</sup> Site Energie Plus

<sup>9</sup> Document SCNAT - SATW *Sources d'énergie : chiffres et faits*

<sup>10</sup> Document Weinmann Energie SA, p.18

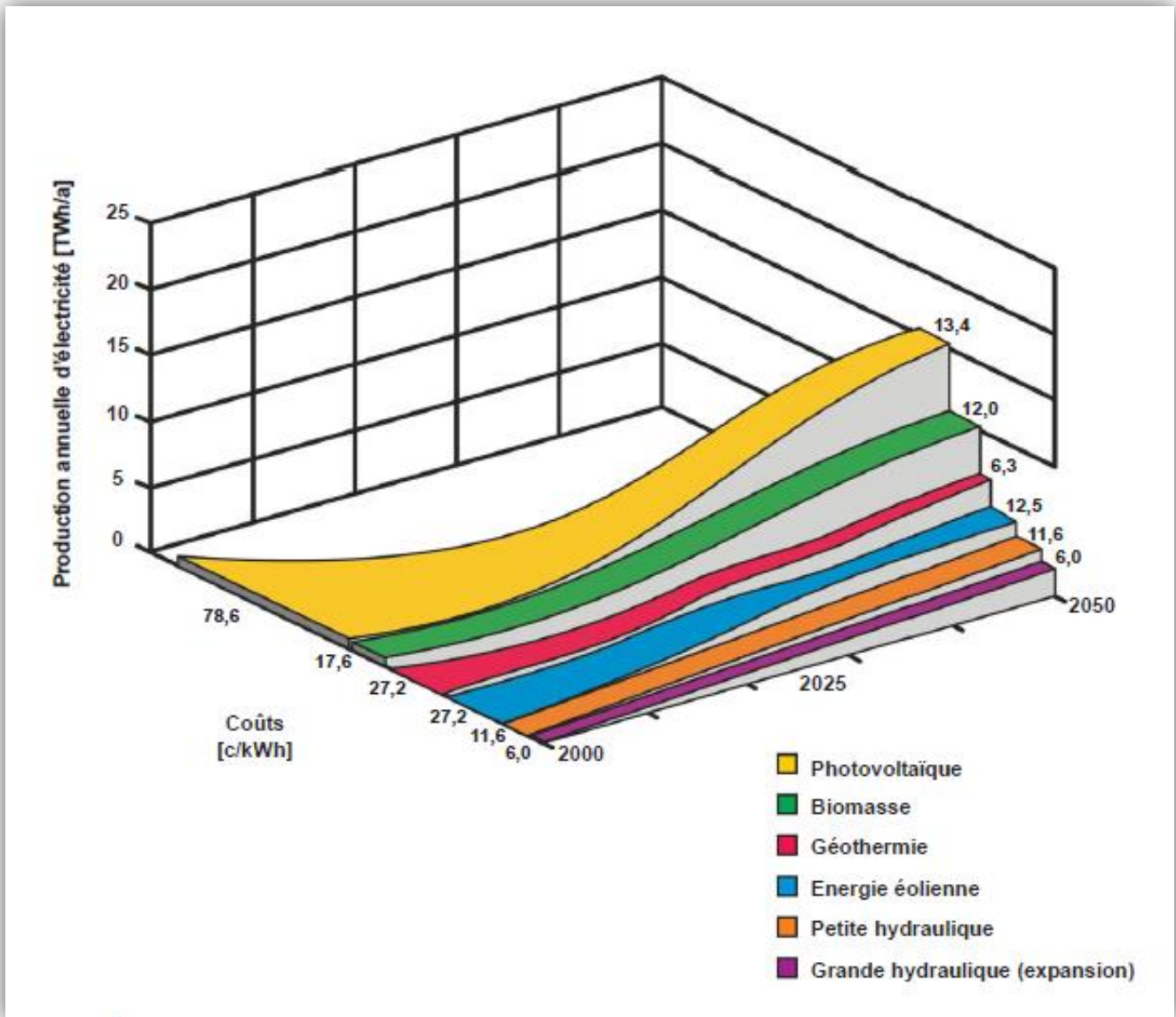


Figure 9 : évolution du prix et de la production d'électricité des différentes énergies renouvelables entre 2006 et 2050

### 1.2.2. Les agro carburants

On appelle agro carburants ou biocarburants tous les combustibles liquides d'origine agricole obtenus à partir de matières organiques végétales ou animales.

### 1.2.2.1. Les différentes sortes d'agro carburants

On classe les agro carburants en trois grands groupes :

- les biocarburants issus des plantes oléagineuses
- les biocarburants basés sur l'alcool
- le biogaz comme biocarburant, le gaz naturel véhiculé

Les biocarburants sont issus de différents procédés de production, selon les plantes à partir desquelles ils sont produits (figure 10).

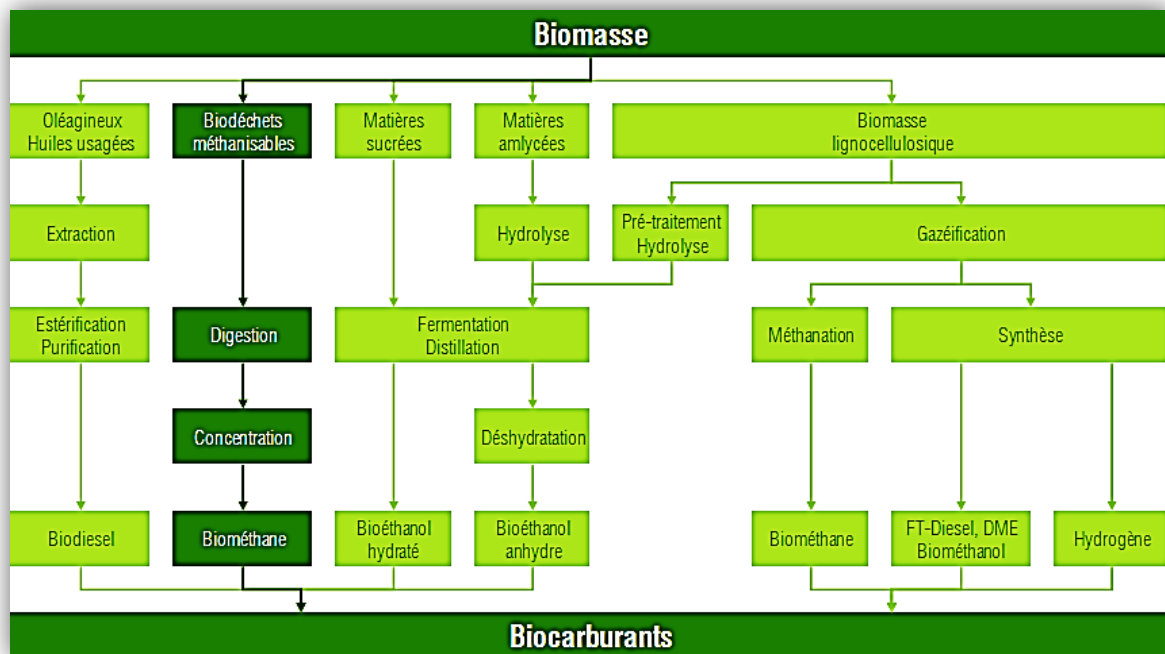


Figure .10 : les différents procédés de la production de biocarburants

#### 1.2.2.1.1. Les biocarburants issus des plantes oléagineuses

Les plantes oléagineuses sont les plantes qui contiennent de l'huile. On utilise pour la production de ce carburant le colza ou le tournesol.

On trouve deux catégories d'huile : les huiles brutes et les esters méthyliques d'huile végétale (EMHV). Les huiles brutes sont obtenues uniquement par pressage des graines alors que les esters méthyliques sont issus de la transformation chimique de ces huiles.

Les huiles brutes peuvent être directement utilisées en tant que carburant alors que l'EMHV est rarement utilisé pur, mais souvent par incorporation au diesel dans des proportions allant de 5 à 30%, ce qui donne du biodiesel, aussi appelé diester. En France, on estime qu'un hectare de colza produit 1,5 tonne d'EMVH. Le rendement du tournesol est en comparaison plus faible : 0,8 tonne par hectare.<sup>11</sup>

#### 1.2.2.1.2. Les biocarburants basés sur l'alcool

Les biocarburants basés sur l'alcool sont produits à partir de la fermentation de plantes contenant du sucre (betterave et canne à sucre) ou de l'amidon (maïs et blé). On appelle ce carburant également agro éthanol.

La betterave et le blé pour la filière biogaz sont principalement produits en Europe, la canne à sucre au Brésil et le maïs aux Etats-Unis. On estime qu'un hectare de betterave et de blé produit respectivement 5,9 et 2,5 tonnes d'éthanol.

L'éthanol peut se trouver dans les agro carburants sous deux formes : à l'état pur ou sous forme d'éthyl tertio butyl éther (ETBE). L'éthanol pur peut être mélangé à l'essence en des proportions allant de 5 à 85%. Lorsque la concentration d'éthanol dépasse les 20%, le moteur du véhicule nécessite une adaptation spécifique. L'éthanol sous forme d'ETBE est le produit résultant de la synthèse de l'éthanol avec l'isobutène, une base pétrolière issue des raffineries. La loi a mis en place des restrictions à propos des proportions d'ETBE autorisées à être incorporées dans l'essence. En France par exemple, l'ETBE peut être incorporé jusqu'à 15% en volume dans l'essence.

---

<sup>11</sup> Site [actu-environnement.com](http://actu-environnement.com)

### 1.2.2.1.3. Le biogaz comme biocarburant

Comme vu dans le point 1.2.1.6, une des utilisations du biogaz est le biogaz comme biocarburant. On peut directement l'utiliser une fois purifié, comme le gaz naturel véhicule (GNV).

### 1.2.2.1.4. L'intérêt des biocarburants

De par l'augmentation du prix du pétrole et la tendance actuelle à remplacer les carburants fossiles, les biocarburants sont de potentiels remplaçants au pétrole, partiellement ou en totalité. D'un point de vue écologique, les agro carburants sont intéressants. En effet, on considère que le CO<sub>2</sub> rejeté lors de leur combustion a été absorbé auparavant lors de la croissance de la plante. Le bilan en CO<sub>2</sub> est donc globalement nul. Selon une étude de l'ADEME réalisée en 2002, il semblerait que l'éthanol produit en France à partir de blé et de betterave rejette 2,5 fois moins de CO<sub>2</sub> que l'essence et que, pour le biodiesel, ce facteur soit de 3,3 par rapport au diesel. Des résultats globalement similaires ont été obtenus par l'étude européenne CONCAWE/EUCAR/JRC en mars 2007. L'écobilan 2007 du biodiesel de colza réalisé par le cabinet Price Waterhouse Coopers (PWC) à la demande de Diester Industrie révèle lui aussi que le Diester de colza restitue 3,68 fois plus d'énergie que celle qui a été nécessaire à sa production et émet 3,7 fois moins de gaz à effet de serre que le gazole.

En plus de l'intérêt économique et écologique de ces produits, apparaissent de nouvelles perspectives de développement pour l'agriculture et un moyen d'augmenter le revenu des agriculteurs.

L'attitude favorable des gouvernements des différents pays à l'égard des biocarburants s'explique donc par un triple objectif : réduire la dépendance énergétique dans le domaine des carburants, diminuer les émissions de gaz à effet de serre et offrir de nouveaux débouchés à l'agriculture.

### 1.2.2.1.5. L'état actuel, le potentiel et les limites du renouvelable

Les biocarburants émettent moins de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère que les autres combustibles et permettent donc de limiter le réchauffement planétaire. Cependant ils ont de nombreux inconvénients non négligeables.

En 2008, plus de 10% de la production mondiale de maïs était consacrée aux biocarburants, ce qui a entraîné une hausse du prix des denrées alimentaires (riz, blé et maïs) au niveau mondial de 50 %. Les premières touchées sont donc les populations qui s'en nourrissent (le Mexique ou le Brésil en particulier). Des experts prédisent des hausses de prix importantes sur tous les aliments de base partout dans le monde ; par exemple +41% pour le maïs d'ici à 2020 ; +76% pour les oléagineux (colza, soja, tournesol) ; +30% pour le blé ; +135% pour le manioc. Si les prix alimentaires suivent ces prédictions, 1,2 milliard de personnes risquent de ne pas manger à leur faim d'ici 2025.<sup>12</sup>



Figure 11 : la culture des sols pour les biocarburants fait concurrence à la culture vivrière

---

<sup>12</sup> Site ConsoGlobe

La destruction de la forêt tropicale amazonienne s'est fortement accélérée, encouragée par une demande soutenue pour le soja ainsi que le maïs, plantes servant à la production de biocarburants. Cette destruction s'effectue essentiellement au Brésil, en Indonésie et en Malaisie. L'Indonésie, possédant près de 80% des dernières forêts tropicales primaires d'Asie du Sud-Est, s'est vue perdre 72% de ses forêts anciennes au cours des 50 dernières années. La déforestation actuelle progresse de près de 1,3 million d'hectares par an soit 10 % de la déforestation chaque année sur l'ensemble de la planète.<sup>13</sup>

Les biocarburants ne semblent pas si efficaces qu'ils n'y paraissent. Le laboratoire des énergies renouvelables du gouvernement américain a comparé les rendements énergétiques des principaux carburants afin de déterminer lequel est le plus optimal. Ce rendement calculé est le rapport entre l'énergie fournie par un carburant et l'énergie nécessaire à sa production.

- Essence = 0,81. Il faut plus d'énergie pour la produire qu'elle n'en fournit.
- Diesel à base de pétrole = 0,83
- Ethanol à base de maïs = 1,25 à 1,35
- Biodiesel de soja = 1,93 à 3,21
- Ethanol de cellulose = de 5 à 6

Cette liste comparative place les biocarburants en première position. Cependant, le rendement n'est pas suffisant à déterminer l'efficacité des biocarburants. Si on prend en compte d'autres critères comme l'émission de gaz à effet de serre par kilomètre parcouru, on voit que les gains apportés par les biocarburants sont assez médiocres et parfois forts décevants. Par exemple, rouler au biodiesel émet plus d'oxyde d'azote que rouler à l'essence.

Les biocarburants apparaissent alors comme une fausse bonne idée.

Cependant les chercheurs étudient d'autres pistes visant à éviter tous ces inconvénients. La plus convaincante est la production de biocarburant à partir d'algues microscopiques. Le rendement de ces agro carburants serait trente fois supérieur à celui obtenu à partir du colza et la culture de ces algues absorberait de grandes quantités de CO<sub>2</sub>. Une autre piste serait d'utiliser des plantes non alimentaires comme le jataphra, capable de pousser en milieu semi-aride, sur des terres inutilisées. Une troisième piste serait de transformer la paille ou le bois en

---

<sup>13</sup> Blog Acteur Durable.org



alcool. Cette méthode s'appelle la lignocellulosique. Quoique encore expérimentaux et ayant leurs inconvénients, ces nouveaux biocarburants pourraient représenter plus de 90% de la production d'agro carburants en 2050, selon l'Agence internationale de l'énergie.

### 1.2.3. Le bois : la biomasse solide

Souvent associé à une époque révolue, le chauffage au bois est de nouveau d'actualité depuis quelques années. La hausse constante du prix du pétrole et des énergies associées (fuel, gaz) n'y est pas étrangère. Derrière cet intérêt économique, on trouve également un intérêt social. Exploiter le bois revient à promouvoir une ressource locale potentiellement créatrice d'emploi. Sans oublier un intérêt écologique puisque le bois est une source d'énergie renouvelable et neutre en CO<sub>2</sub>, rejetant en brûlant la même quantité de gaz carbonique absorbé que lors de sa croissance.

Aux côtés du biogaz et des biocarburants, la filière bois-énergie appartient en effet aux énergies renouvelables basées sur l'utilisation de la biomasse.

Le bois-énergie n'est rien d'autre que la combustion du bois sous différentes formes : écorces, sciures, broyats de déchets de bois et plaquettes.

#### 1.2.3.1. Les différents combustibles

L'exploitation des forêts et l'industrie du bois (scieries et menuiseries) génèrent des sous-produits utilisables comme combustibles. Ils se présentent sous plusieurs formes et avec des caractéristiques qui leur sont propres. Ils se différencient surtout par leur pouvoir calorifique. Selon le type d'arbre (feuillus ou résineux), l'essence du bois, sa dureté ou encore son conditionnement, le bois dégagera plus ou moins de chaleur.

Parmi les combustibles issus de la forêt, la bûche reste le combustible le plus utilisé. Les bûches peuvent être utilisées dans des cheminées ouvertes, des inserts, des foyers fermés, des poêles, des cuisinières et nécessitent une alimentation manuelle. Il faut privilégier les bûches de bois dur très sec (humidité inférieure à 25%) pour un contenu énergétique élevé.

Outre les bûches, le bois déchiqueté, appelé aussi plaquettes forestières (figure 12), est également issu de l'exploitation des forêts et alimente de manière automatique les appareils de chauffage. L'élagage et le défrichage produisent en effet un grand nombre de branches et résidus qui peuvent être déchiquetés sur place ou plus tard après séchage. Le contenu énergétique des plaquettes forestières vertes est en moyenne de 2.200 à 2.800 kWh par tonne pour une humidité de 40 à 50%. Pour des plaquettes forestières fines et sèches (humidité de 20 à 30 %), le contenu est de 3.300 à 3.900 kWh par tonne.<sup>14</sup>



Figure 12 : plaquettes forestières

#### 1.2.3.2. L'utilisation

La combustion du bois-énergie regroupe toutes les utilisations du bois pour produire de la chaleur, de l'électricité ou les deux simultanément en cas de cogénération. Le bois utilisé est issu de l'entretien des forêts, de l'industrie forestière et dans de plus petites proportions issu des déchets. Le bois-énergie est majoritairement utilisé pour la production de chaleur.

Le bois-énergie s'adresse à quatre types d'utilisateurs : les particuliers pour un usage domestique, les entreprises et notamment celles de l'industrie du bois, les collectivités et le secteur agricole.

Le secteur domestique utilise encore le bois essentiellement sous forme de bûches pour le chauffage d'habitations. En Suisse, 30 ans d'utilisation, on ne remarque qu'un changement d'usage : l'utilisation traditionnelle du bois (cuisinière, chaudières) a été délaissée au profit d'un usage d'appoint (inserts, foyers fermés, poêles).

Vient ensuite le secteur industriel qui utilise une petite part de la production de chaleur et la quasi-totalité de la production d'électricité. Il est composé principalement des entreprises

---

<sup>14</sup> Site Actu-environnement

de la filière bois qui valorisent leurs coproduits en chaudière (écorces, sciures, liqueurs noires, chutes). Globalement, cette valorisation est progressivement montée en puissance.

Le secteur collectif/tertiaire recouvre quant à lui l'ensemble du chauffage collectif par chaudière bois, avec ou sans réseau de chaleur, pour l'habitat (résidences, immeubles) et le tertiaire (bureaux, bâtiments administratifs, hôpitaux, écoles...). Les écorces, sciures, broyats de déchets de bois et plaquettes sont les combustibles les plus valorisés dans ces chaudières collectives. Ce secteur ne représente cependant qu'une faible part de la production mais le parc de chaufferie collective est en croissance constante.

Enfin, le secteur agricole est amené à utiliser le bois pour le chauffage de serres maraîchères et botaniques essentiellement, mais il ne représente qu'une infime part de la production.

### 1.2.3.3. L'état actuel et le potentiel

#### 1.2.3.3.1. Au niveau suisse

Dans nos régions le bois ne manque pas. En Suisse, la consommation de bois de chauffage pourrait augmenter sans problème. L'énergie du bois est, après l'hydraulique, notre deuxième source d'énergie et donc un facteur important de notre économie nationale et régionale.

La forêt suisse est fortement sous-exploitée. L'accroissement annuel en bois est de 9 à 10 millions de mètres cubes, tandis que l'exploitation annuelle n'atteint en moyenne que 7.1 millions de mètres cubes.<sup>15</sup> L'industrie forestière suisse étant en crise, il est donc primordial de créer de nouveaux débouchés pour ses produits. Une grande utilisation du bois-énergie pourrait être la solution à cette crise. De plus, la production de bois-énergie se ferait sans concurrencer les autres filières de l'industrie du bois, comme la construction ou l'ameublement, puisque le bois-énergie valorise essentiellement des déchets de forêts.

"La forêt bûche pour nous". Ce slogan qui a accompagné la promotion du bois-énergie pendant des années souligne un fait indéniable : une importante utilisation de l'énergie du

---

<sup>15</sup> Site Energie-bois Suisse

bois donne un nouvel élan à l'économie nationale et régionale. L'argent généré par ce commerce est réinvesti au niveau régional et contribue à la création et au maintien de places de travail. Grâce à l'économie forestière, environ 100'000 places de travail dans des régions éloignées des centres économiques sont maintenues.

Une augmentation de la production et de l'utilisation du bois en tant qu'énergie n'est en rien une maltraitance des forêts. Bien au contraire : la santé et la vitalité de celles-ci seraient ainsi maintenues. Ce cycle est parfait aussi longtemps qu'on n'utilise pas plus de bois qu'il n'en repousse et pour cela la Suisse dispose de ressources suffisantes.

Le bois-énergie (tout comme les autres agents énergétiques produits à partir de la biomasse) entre alors dans un concept liant de façon équilibrée des conditions économiques, environnementales, sociales et culturelles (figure 13). Ce concept n'est autre que le développement durable. Miser sur l'énergie du bois c'est donc miser sur une énergie locale, renouvelable et neutre en CO<sub>2</sub>. Cela permet également de renforcer les régions rurales de notre pays et contribue à l'entretien et à la santé de nos forêts.

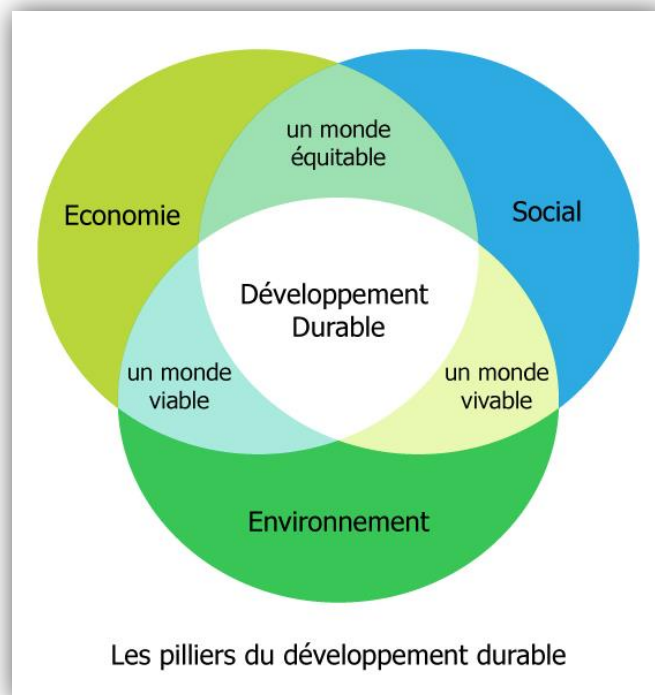


Figure 13 : les piliers du développement durable

## 2. 2<sup>e</sup> partie : intégration de la biomasse dans la politique énergétique suisse et européenne

La Suisse a pris la décision de sortir définitivement du nucléaire d'ici 2034. Afin de remplacer toute l'énergie produite jusqu'ici à partir de l'uranium, elle doit développer une autre filière énergétique. Comme expliqué précédemment, la biomasse est une source d'énergie au grand potentiel et aux nombreux avantages. Il ne reste plus qu'à évaluer la proportion de son intégration dans la politique énergétique suisse.

### 2.1. L'énergie dans le monde

Aujourd'hui tout ce qui nous entoure est énergie. Allumer une lampe, un téléviseur, faire cuire un plat, démarrer un lave-vaisselle, sont des gestes de tous les jours. L'usage des énergies et leur accès est si simple – il suffit parfois uniquement d'appuyer sur un interrupteur – qu'il n'est pas facile d'y associer une part de responsabilité. La plupart des gens ne pensent pas avoir les choix de mieux ou moins consommer.

Une meilleure consommation de l'énergie ne suffira pourtant pas à réduire la consommation énergétique mondiale. Cette dernière est en constante augmentation, due à différents facteurs : l'augmentation de la population, l'émergence d'une classe moyenne dans les pays en développement qui aspire à une qualité de vie telle qu'en Occident. Sans compter que presque un quart de la planète n'a aucun accès à l'énergie, bien qu'il s'agisse d'un droit fondamental. L'énergie n'est répartie sur la Terre ni de façon égale ni équitable. Actuellement près de 1,4 milliards de personnes ne sont pas reliées au réseau électrique.<sup>16</sup>

L'utilisation de l'énergie est donc en constante augmentation, ce qui implique une hausse de la production. La majeure partie de la production provient des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) ou minérales (uranium). Cependant ces énergies ont leur lot d'inconvénients : les conséquences environnementales de leur exploitation sont inquiétantes, comme le réchauffement climatique, qui est directement causé par leur combustion et qui menace les équilibres biologiques et écologiques de notre planète. D'autres conséquences plus sociales sont à rele-

---

<sup>16</sup> Livre *Après Fukushima, quelles énergies pour demain ?* p. 19

ver, les accidents nucléaires entre autres ont déjà tué un certain nombre de personnes : en mai 2011, des experts du programme Global Security de l'Union of Concerned Scientists (UCS) ont estimé le nombre de cancers mortels induits par les radiations émises suite à la catastrophe de Tchernobyl entre 25 et 50 000, sans compter les cancers de la thyroïde, ces derniers estimés par le Comité scientifique des Nations Unies sur les Effets des Radiations Atomiques (UNSCEAR) à 6 000.<sup>17</sup>

Il s'avère ainsi nécessaire de concevoir une nouvelle ère, celle des énergies vertes, des énergies renouvelables et d'une consommation maîtrisée.

## 2.2. Une fin pour le nucléaire

Que ce soit au niveau mondial ou au niveau suisse, le nucléaire perd de sa popularité. Quelles en sont les raisons ? Où en sommes-nous aujourd'hui dans ce déclin ?

### 2.2.1. L'état actuel

#### 2.2.1.1. La production mondiale

Contrairement à ce qu'on pourrait croire, le nucléaire n'est pas la principale énergie mondiale. Bien que peut-être la plus efficace, elle ne représente que 13% de l'électricité mondiale et 7% de l'énergie mondiale<sup>18</sup> et seuls 32 pays sont équipés pour la produire (figure 14).

---

<sup>17</sup> Site [notre-planete.info](http://notre-planete.info)

<sup>18</sup> Livre *Après Fukushima, quelles énergies pour demain ?* p. 87

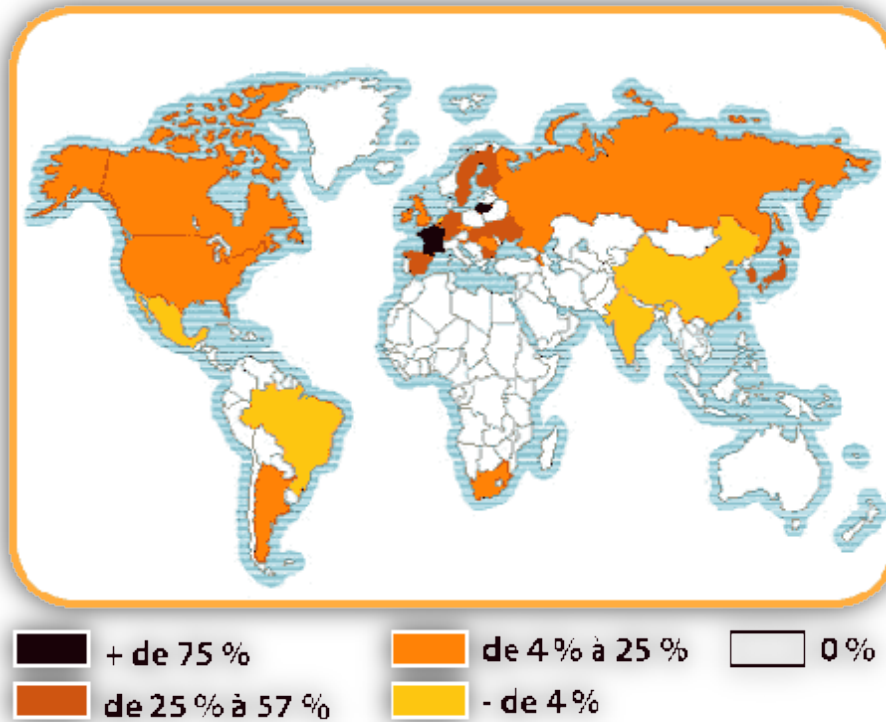


Figure 14 : la production d'énergie nucléaire dans le monde et sa part dans chaque pays

### 2.2.1.2. La production suisse

L'énergie nucléaire est la deuxième source d'électricité en Suisse. Les 5 centrales du pays fournissent environ 38% de l'électricité nationale (figure 15).<sup>19</sup> Si l'on se compare à nos voisins français, ce pourcentage est encore très modeste, les Français dépendant à environ 75% de l'énergie atomique.<sup>20</sup> Cependant, nous ne sommes pas ceux qui consomment le moins (figure 16).

<sup>19</sup> Site Office fédéral de l'énergie OFEN

<sup>20</sup> Livre *Après Fukushima, quelles énergies pour demain ?* p. 87

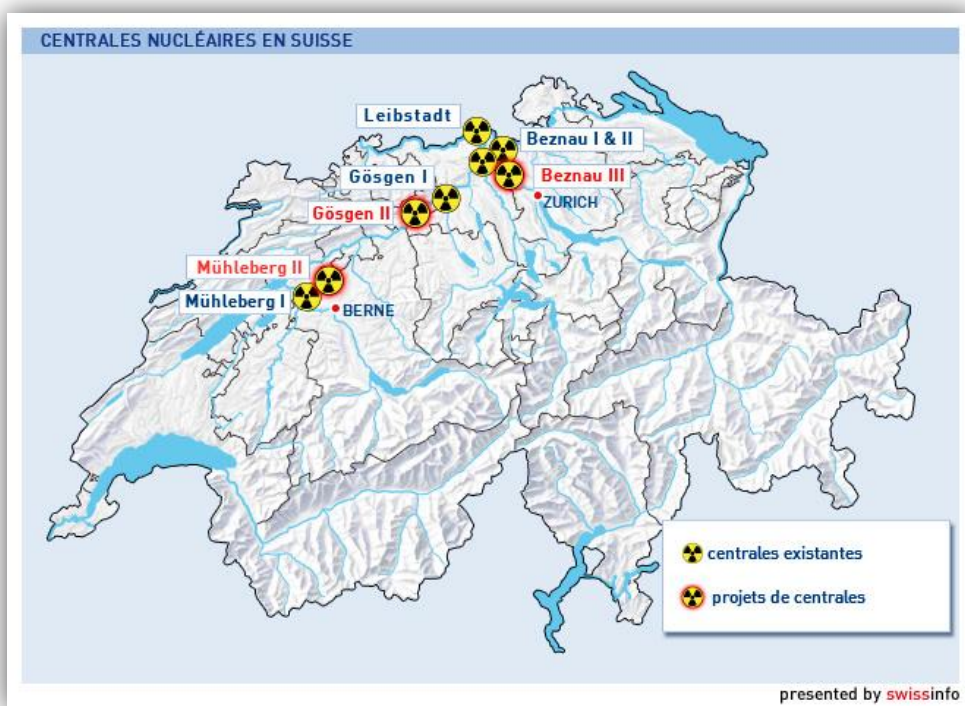


Figure 15 : les centrales nucléaires en Suisse

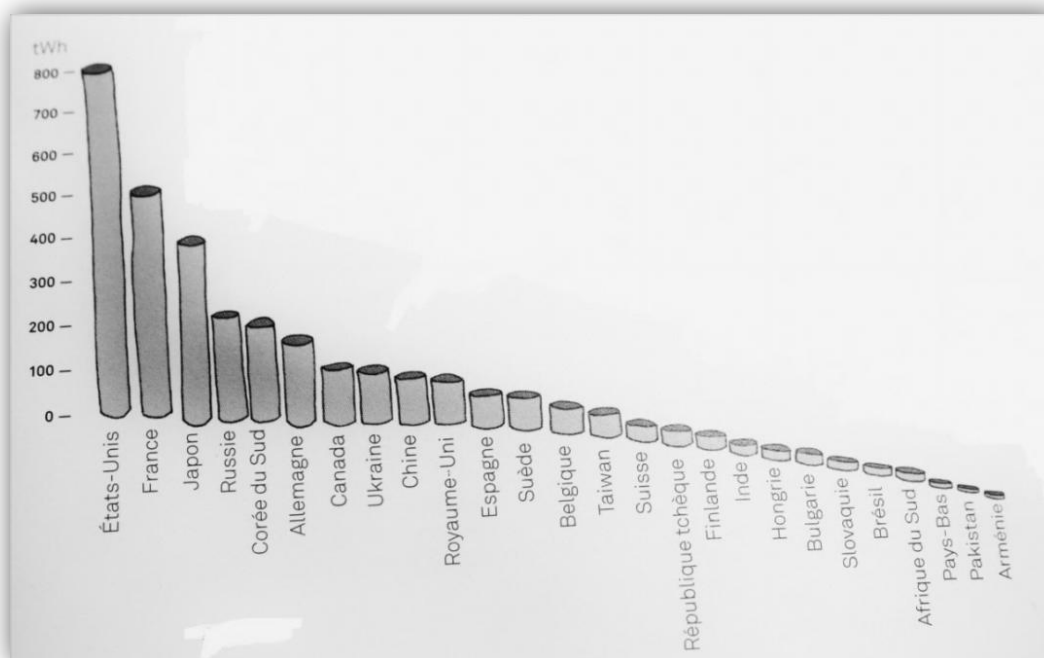


Figure 16 : l'électricité d'origine nucléaire dans le monde en 2009 (térawattheures)



### 2.2.2. La remise en cause du nucléaire

Avant même Fukushima, le nucléaire était déjà remis en cause. En mars 2011, il y avait 437 réacteurs en fonctionnement sur Terre, 7 de moins qu'en 2002.<sup>21</sup> Le déclin a commencé après la catastrophe de Tchernobyl. Toutefois, les pays émergents continuent à s'intéresser de façon presque obsessionnelle au nucléaire, à l'image de la Chine qui est en train de construire 26 nouveaux réacteurs. Le nucléaire est-il encore une énergie d'avenir ?

Le nucléaire, en dehors des accidents qui – bien que non maîtrisables pour l'homme – sont rares, n'est pas au point quant à la gestion des déchets. Certains de ces déchets resteront radioactifs pour les 100'000 ans à venir et personne ne sait comment s'en débarrasser ! Une première solution est le stockage « définitif » en profondeur, une deuxième solution serait l'entreposage de longue durée en surface ou à faible profondeur. Mais comment certifier que ces sites resteront sûrs pendant toutes ces années? Ces déchets, qu'ils soient enfouis ou entreposés, restent une menace importante pour les générations futures.



Figure 17 : stockage des déchets nucléaires

Des recherches quant à l'amélioration du nucléaire sont en cours. On perfectionne les installations, on crée de nouvelles générations de réacteurs, on s'intéresse à la fusion de l'hydrogène plutôt qu'à la fission de l'uranium, on parle de recyclage des déchets radioactifs, ... L'EPR Flamanville 3 en France est la première centrale avec un réacteur de 3<sup>e</sup> génération : un réacteur plus sûr, plus économe, plus performant et qui réduit l'impact sur l'homme et l'environnement, en diminuant de 30% le volume des déchets à vie longue.<sup>22</sup> Développer le nucléaire mènerait peut-être à la conception d'une énergie plus sûre, efficace, respectueuse de l'environnement et des générations futures. Mais en attendant l'élaboration d'une telle énergie, développons d'autres voies, comme celle des énergies renouvelables par exemple.

<sup>21</sup> Livre *Après Fukushima, quelles énergies pour demain ?* p. 90

<sup>22</sup> Document EDF *L'EPR Flamanville 3*, EDF

### 2.2.3. La sortie définitive du nucléaire de la Suisse

Après l'accident survenu à Fukushima en mars 2011, la Suisse a pris la décision de sortir définitivement du nucléaire d'ici à 2034. Afin de réduire les risques au maximum, le plus vite serait le mieux. Cependant, arrêter immédiatement toutes les centrales est impossible. D'autres pays ont déjà pris cette décision auparavant : l'Autriche en 1978, la Suède en 1980, l'Italie en 1987, la Belgique en 1999, l'Allemagne en 2000.<sup>23</sup> Tous ont fixé une échéance plus ou moins proche.

Cette sortie n'est perçue de façon positive que par un nombre restreint de personnes. La majorité réagit plutôt mal. Une sortie du nucléaire alors que la production d'énergie en est très dépendante est assez mal perçue (figure 18). Le domaine du nucléaire fait vivre beaucoup de monde, une sortie mettrait bien des métiers en péril et entraînerait de manière sûre une augmentation du coût de l'électricité. Le nucléaire est pour la Suisse comme pour de nombreux autres pays, un élément majeur pour l'industrie et l'économie nationale. Certains se posent alors la question de savoir si toucher à ce pilier ne risque pas de bouleverser tout un équilibre.

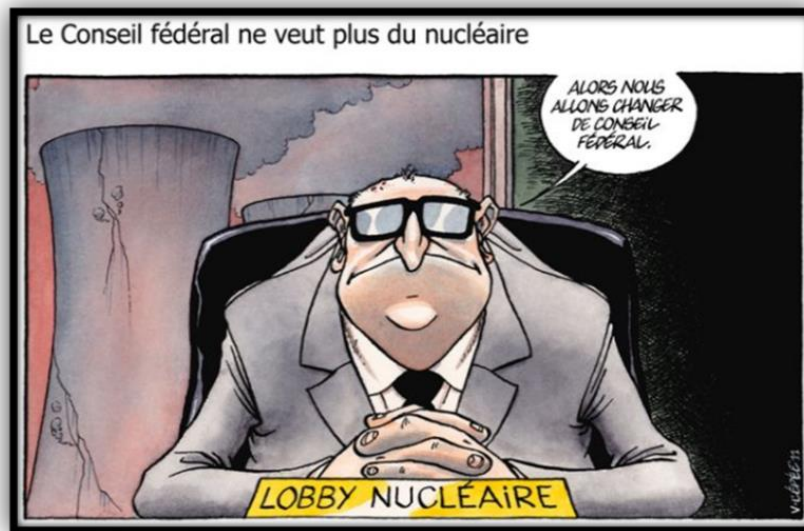


Figure 18 : dessin de Vincent L'Epée, Le Conseil fédéral ne veut plus du nucléaire

---

<sup>23</sup> Livre *Après Fukushima, quelles énergies pour demain ?* p. 120

Il est donc nécessaire de penser à une solution pour garantir l'avenir énergétique, économique, social et écologique de la Suisse. De par leur rejet négligeable en CO<sub>2</sub> (bien qu'elles ne soient pas neutres en carbone, leurs installations nécessitant de l'énergie pour leur construction) et leurs ressources quasi-inépuisables, les énergies renouvelables semblent être les plus aptes au remplacement du nucléaire. Pourtant aucune technologie ne remplacera à elle seule les énergies fossiles ou le nucléaire. Chacune a des inconvénients et des avantages. La solution se trouverait donc dans une combinaison intégrant les différentes formes d'énergie (de préférence renouvelables) en fonction des particularités de la Suisse. On se dirigerait vers une vision très locale et autarcique en matière d'approvisionnement énergétique. Cependant, il y a un aspect non négligeable : la Suisse importe énormément d'énergie. Actuellement, près de 70 % de l'énergie consommée provient des centres de production de nos voisins.<sup>24</sup> Une autre solution serait alors de répartir la production des énergies renouvelables à travers le monde, que chacun se spécifie selon ses capacités, pour ensuite créer un système d'échange international solide.

## 2.3. La révolution énergétique par le renouvelable

### 2.3.1. Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables s'opposent aux énergies fossiles sur différents points. Elles n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes, participent à la lutte contre l'effet de serre en rejetant peu de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, elles sont produites à partir de ressources locales quasi-inépuisables et génèrent des emplois. Elles sont fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux.

#### 2.3.1.1. Les différents types d'énergies renouvelables

On classe les énergies renouvelables en cinq grandes familles à l'intérieur desquelles coexiste une large diversité de technologies: le solaire (solaire photovoltaïque et thermique), l'hydroélectricité, l'éolien, la géothermie et la biomasse (figure 19).

---

<sup>24</sup> Site Office fédéral de l'énergie OFEN



Figure 19 : les différentes énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont une source de profit et d'emplois. C'est ce qu'on appelle « l'économie verte ». Aujourd'hui, au niveau planétaire, pas moins de 3,5 millions d'emplois seraient dédiés aux énergies renouvelables. Quant aux investissements dans le secteur, ils auraient atteint 211 milliards de dollars en 2010. Ces chiffres risquent encore d'augmenter, surtout depuis la décision de la Suisse de sortir du nucléaire.<sup>25</sup>

Les énergies renouvelables seraient une bonne solution de remplacement au nucléaire compte tenu de l'urgence climatique dans laquelle l'homme s'est plongé. Elles ne connaissent pas d'accidents et ne produisent pas de déchets, préservant ainsi les générations futures. Elles sont beaucoup moins dangereuses au quotidien que les énergies fossiles : elles dépendent peu du travail dans les mines. Les énergies renouvelables ne sont pas nocives pour la santé : selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), chaque année 1,3 million de personnes meurent à cause de la pollution de l'air, provenant quasi exclusivement de la combustion des énergies fossiles. Elles ne nécessitent pas de carburant dont les réserves sont limitées et dont le coût pourrait augmenter en raison de pénurie soudaine. Les énergies renouvelables nous garantiraient donc une indépendance énergétique et un équilibre économique.

### 2.3.1.2. La part et la croissance des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables contribuent actuellement pour 13% à l'énergie primaire mondiale, avec comme principale énergie la biomasse qui occupe 10% environ de la produc-

---

<sup>25</sup> Livre *Après Fukushima, quelles énergies pour demain ?* p. 128

tion mondiale. Les 3% représentent toutes les autres formes d'énergies renouvelables, essentiellement dus à l'hydraulique avec un pourcentage de 2%.<sup>26</sup>

Cette part du marché occupée par les énergies renouvelables a beaucoup évolué depuis leur apparition dans les années 70 (figure 20). Aujourd'hui ces énergies sont en constante croissance, à un rythme différent selon les pays (figure 22). Depuis 1996, la production solaire a été multipliée par soixante, la production éolienne par vingt. Ces énergies continuent à croître sans cesse et occupent une place toujours plus importante sur le marché.<sup>27</sup>

Les technologies évoluent rapidement, les centrales de production et se perfectionnent toujours plus, on parle de deuxième ou de troisième générations des différentes technologies. Ces améliorations garantissent une meilleure production, mieux adaptée à nos besoins. Ces énergies devenant toujours plus populaires, leur coût a diminué proportionnellement à leur croissance et bien qu'elles restent encore chères, elles sont de plus en plus accessibles. Par exemple, les prix de l'éolien et du photovoltaïque ont considérablement chuté depuis leur apparition (figure 21).

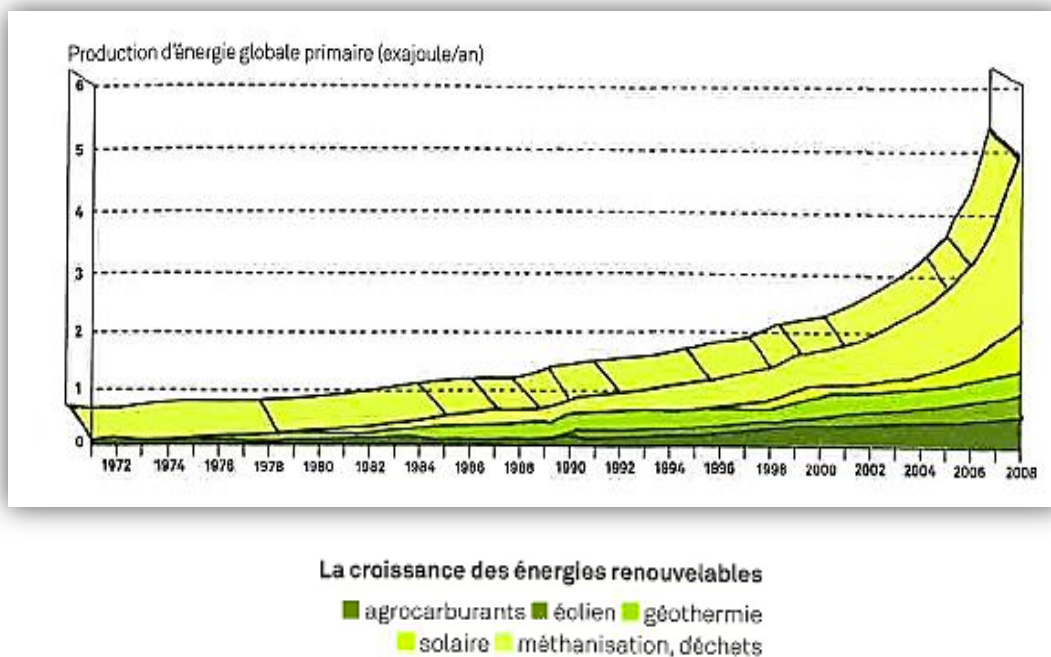


Figure 20 : Production d'énergie globale primaire

<sup>26</sup> Livre *Les enjeux de l'énergie après Fukushima*, p. 52

<sup>27</sup> Livre *Après Fukushima, quelles énergies pour demain ?* p. 128-129

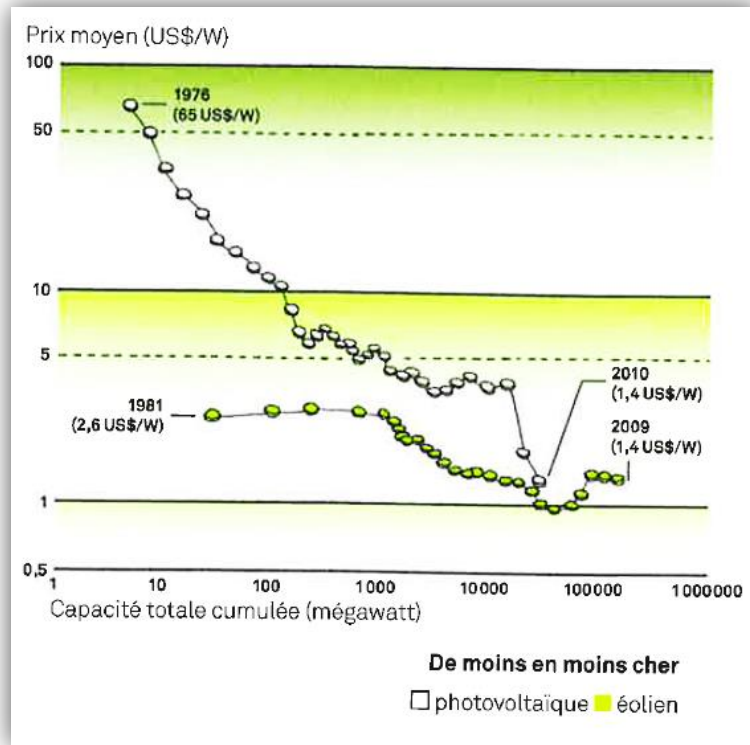


Figure 21 : les prix de l'éolien et du photovoltaïque chutent

Croissance, en pourcentage, de la production d'électricité pour chaque type d'énergie renouvelable et de la production d'agrocarburants. Adaptée des données de Mars 2011 de L'EIA [1].

	Hydrau- lique	Géo- thermie	Éolien	Solaire élec- trique	Bio- masse élec- trique	Agro- carbu- rants
Période	1980- 2008	1980- 2008	2000- 2008	2000- 2008	1980- 2008	2001- 2008
Allemagne	+8	-	+330	+3700	+440	+850
Autriche	+ 31	-	+2900	+470	+1500	+1900
Brésil	+ 184	-	+69000	+137000	+900	+140
Canada	+ 50	-	+1300	+30	+550	+430
Chine	+ 800	-	+2000	+650	pas de données	+45000
Danemark	-	-	+70	+180	+1700	+270
Espagne	- 20	-	+580	+10600	+1100	+1100
États-Unis	-8	+194	+900	+60	+15300	+540
France	-7	-	+7300	0	+760	+700
Inde	+ 143	-	+700	+70	pas de données	+110
Japon	- 14	+152	+2300	+380	+150	-
Pays-Bas	-	-	+400	+200	+560	-
Portugal	- 14	+ 6000	+3300	+3700	+570	-
Royaume Uni	+30	-	+650	+750	+380	
Russie (depuis 1990)	- 4	-	-	-	-	-
Suède	+18	-	+340	+100	+1300	+1000
Suisse	+10	-	+530	+200	+1300	-
Turquie	+195	+ 4100	+2500	-	+60	-
Europe	+23	+285	+440	+970	+920	+940

Figure 22 : Croissance en % des énergies renouvelables dans les différents pays

## 2.4. La biomasse

### 2.4.1. La part et la croissance de la biomasse

#### 2.4.1.1. Au niveau mondial

La biomasse contribuerait pour 10% à l'énergie primaire mondiale. C'est l'énergie renouvelable la plus produite. Cette filière (biomasse comme bois) est déjà bien développée à travers le monde et son potentiel est grand (figure 23).

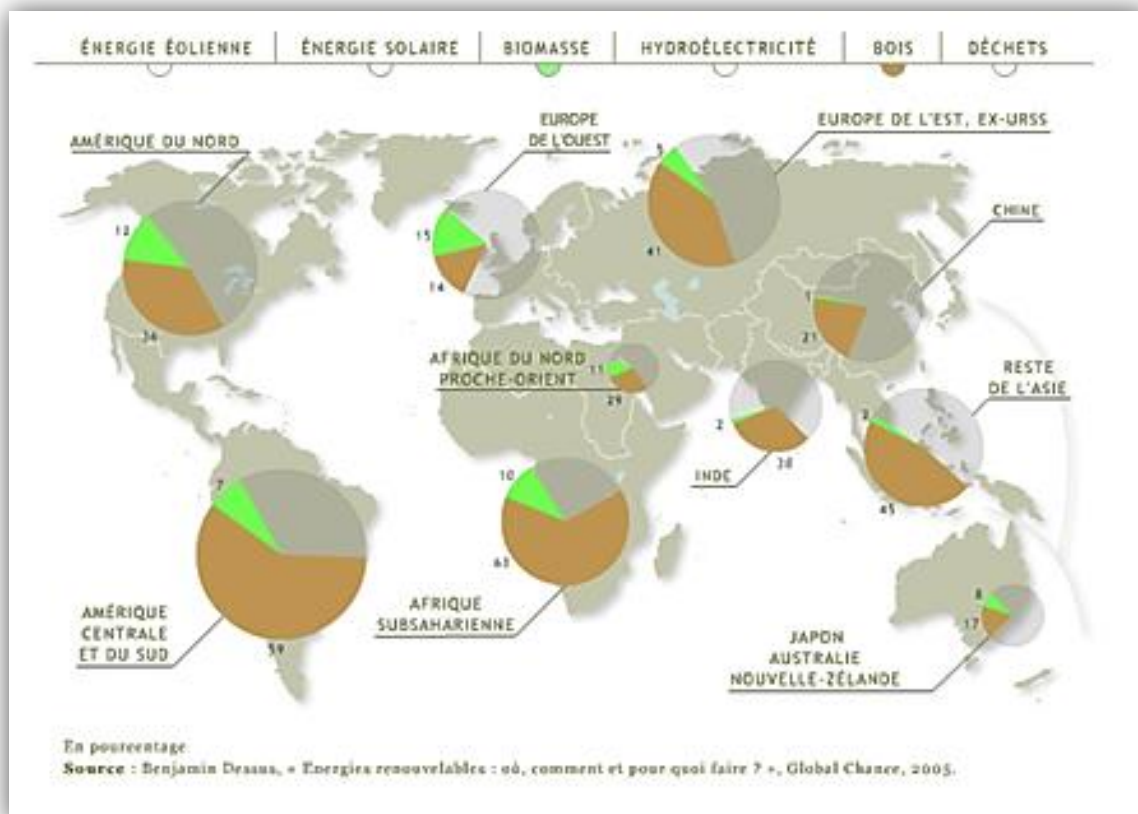


Figure 23 : Potentiel des énergies renouvelables – bois et biomasse – à l'horizon 2020

#### 2.4.1.2. Au niveau suisse

Les sources d'énergies renouvelables connaissent actuellement un bel essor en Suisse. En 2010, 56,5% de la production électrique nette provenait de l'énergie hydraulique, et seu-



lement 2,2% des autres sources renouvelables.<sup>28</sup> Il est à noter que, si on fait abstraction de l'énergie hydraulique, la plus grande part des énergies renouvelables provient du traitement des déchets et de la biomasse et non du vent ou du soleil (figure 24).

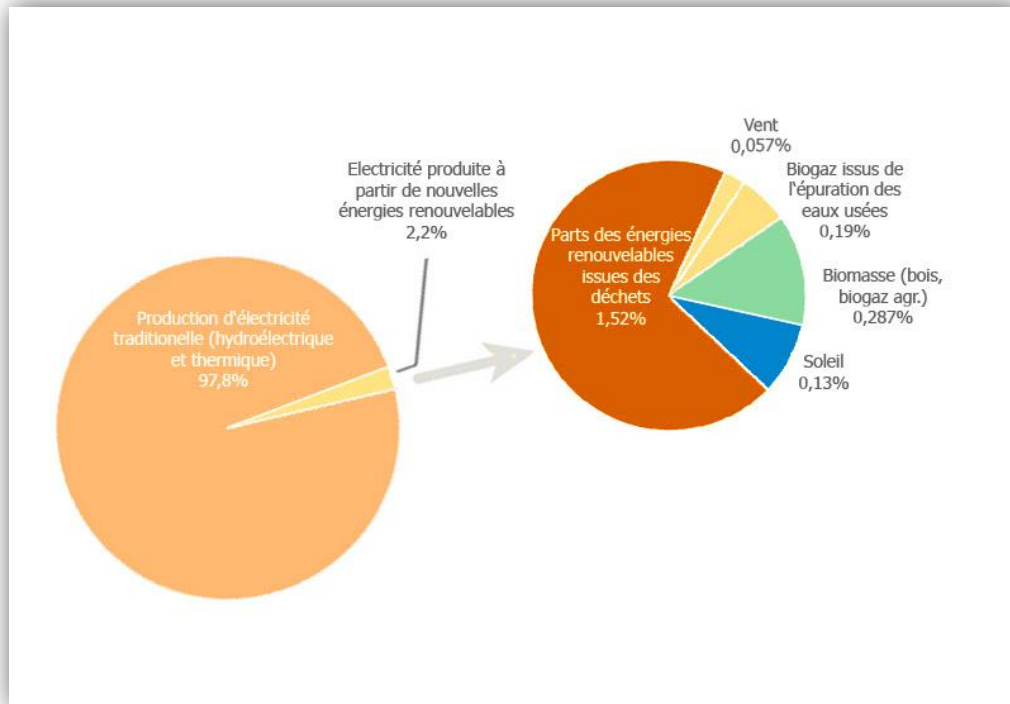


Figure 24 : approvisionnement de la Suisse en énergies renouvelables

La Confédération a pris en compte le problème, a suivi la même logique et a lancé un programme d'encouragement visant à augmenter tout d'abord la production puis l'utilisation du biogaz.<sup>29</sup> Il consiste en diverses subventions financières, servant à investir dans de nouvelles installations, ainsi qu'à injecter et transporter du biogaz dans le réseau. L'Association Suisse de l'Industrie Gazière qui a mis en œuvre ce programme d'encouragement en collaboration avec la Confédération précise bien que seul le biogaz à partir de déchets et de substances résidentielles sera encouragé : on ne produit pas de végétaux à cet effet uniquement, afin de ne pas empiéter sur les cultures vivrières.

<sup>28</sup> Document OFEN *Statistiques suisses des énergies renouvelables 2010*

<sup>29</sup> Site gaz-naturel.ch

Un engagement de l'agriculture dans la production de biogaz agricole serait pour cette filière absolument bénéfique : l'agriculture, ayant toujours plus de peine à s'en sortir financièrement, verrait dans la production de biogaz une alternative, comme d'autres l'ont vu dans l'agritourisme, une aide permettant au secteur agricole de reprendre de l'aisance dans son activité.

Nous allons par ailleurs devoir faire face à une pénurie d'approvisionnement en pétrole d'ici quelques années. Bien que le biogaz serve principalement à alimenter les chauffages, on le retrouve également dans les biocarburants (un minimum de 10%), parmi d'autres agro carburants.<sup>30</sup> Outre leur contribution aux remplacements des carburants à pétrole, les biocarburants renforceraient une des stratégies de la Confédération en matière de lutte contre le réchauffement climatique, qui consiste à encourager les carburants respectueux de l'environnement. Une incitation financière est justement un moyen d'encourager ces carburants : on réduit certaines taxes sur le gaz naturel, comme par exemple l'impôt sur les huiles minérales.

Le biogaz est un pilier toujours plus important de l'approvisionnement énergétique de la Suisse. Les consommateurs toujours plus nombreux à vouloir utiliser le biogaz. Par conséquent, la production augmente elle aussi. Le nombre d'exploitations agricoles produisant du biogaz croît donc lui aussi : elles étaient 69 en 2000, elles sont aujourd'hui au nombre de 72.<sup>31</sup>

#### 2.4.2. Aspects environnementaux

La production et l'utilisation du biogaz ont un impact positif sur l'environnement. En effet, le biogaz se substitue très fréquemment aux énergies fossiles, ce qui contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre, responsables en partie du dérèglement climatique. Au cours de leur transformation, les matières organiques végétales utilisées pour produire du biogaz émettent la même quantité de CO<sub>2</sub> que celle absorbée pendant leur croissance ou leur production. On dit du biogaz qu'il est neutre en CO<sub>2</sub> (figure 25). Dès lors, l'utilisation de la biomasse, continuellement renouvelable, engendre un processus de cycle. L'émission de CO<sub>2</sub> est

---

<sup>30</sup> Site gaz-naturel.ch

<sup>31</sup> Document OFEN *Schweizerische Statistik der Erneuerbaren Energien, annexe B, chiffre 4, p. 61*

maîtrisée et stabilisée. De plus, dans le cas des effluents d'élevage, la production de biogaz permet de limiter considérablement les rejets de méthane, ce dernier étant l'un des principaux gaz à effet de serre (l'effet du méthane sur l'effet de serre est 25 fois plus important que celui du CO<sub>2</sub>).

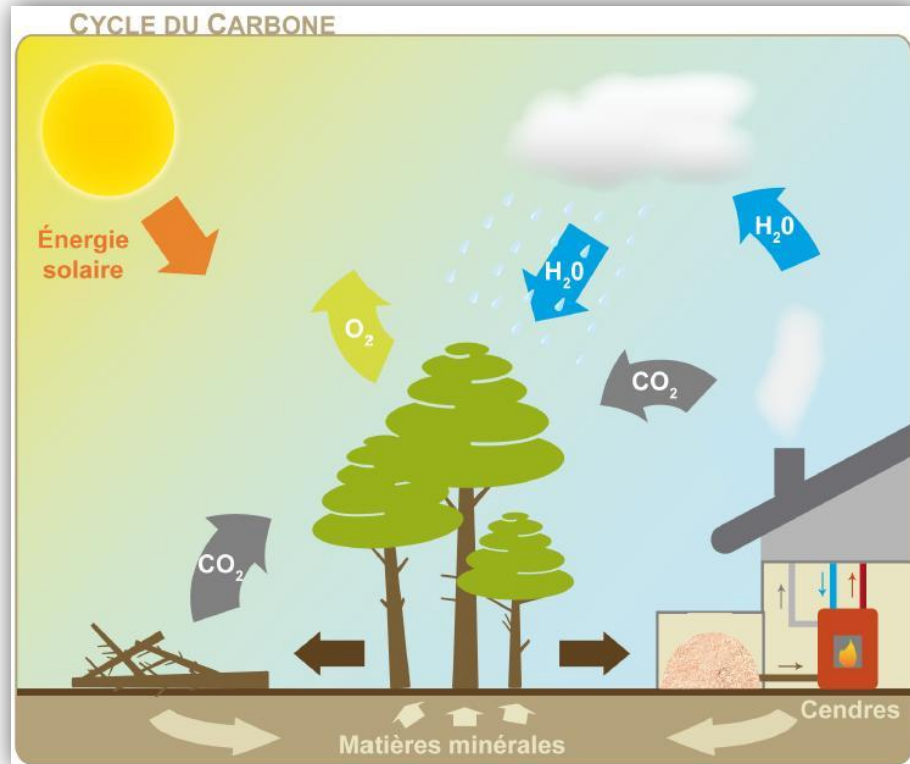


Figure 25 : la biomasse est neutre en CO<sub>2</sub>

#### 2.4.2.1. Aspects économiques

Comme pour tout, un tel projet a un coût : investir dans de nouvelles installations, former du personnel, etc. ... Pour que la production soit intéressante, il est important que les investissements dans les installations d'énergies renouvelables soient économiquement rentables.

Les coûts d'investissements pour une installation de biogaz appartenant à un particulier se situent aujourd'hui entre 70'000 et 1,5 millions de francs.<sup>32</sup> Une fois les coûts de dépôts couverts, il est essentiel de valoriser au maximum l'installation de différentes façons : en valorisant le plus de substrats possible, ce qui garantit un rendement énergétique élevé ou en optimisant la production au maximum en évitant autant qu'on le peut les pertes d'énergies lors du traitement de la biomasse (récupération de la chaleur, etc. ...). La Confédération redistribue aux producteurs d'énergie renouvelable 15 à 25 centimes par kWh, un plus qui permet de diminuer les coûts de l'installation. C'est la redevance à prix coutant, également appelée valeur ajoutée au courant vert. Des aides financières peuvent être demandées auprès des offices cantonaux de l'agriculture qui offrent parfois des subventions et auprès de fondations actives dans le domaine de l'agriculture (Aide aux Montagnards, Coop Naturaplan, ...) ou de la protection du climat (Fondation Centime Climatique, Fondation Myclimate, ...).

L'amortissement de ces installations peut être plus ou moins rapide, selon l'importance des taux d'intérêts des capitaux empruntés et selon le prix auquel les gestionnaires rachètent le courant. On estime l'amortissement de ces installations à 10 ans environ.

Il est difficile, voire impossible, d'estimer à combien s'élèverait la facture d'un remplacement du nucléaire par la biomasse. Mais il est nécessaire de comprendre que le développement de la biomasse c'est bien plus que débloquer des fonds. Développer cette filière, c'est assurer notre avenir énergétique, créer de nouveaux emplois, remplacer les postes supprimés avec la sortie du nucléaire, faire vivre la Suisse à partir d'une industrie locale, maintenir l'économie nationale à un bon niveau et garantir au pays une indépendance énergétique. La décision de développer la production d'énergie à partir de la biomasse n'est plus qu'un choix politique, tout comme la vitesse de ce développement.

---

<sup>32</sup> Site BiomassEnergie

### 3. Bilan et conclusion

Suite à l'accident de Fukushima survenu le 11 mars 2011, les esprits se sont réveillés et la Suisse, comme bien d'autres pays, a pris conscience des dangers et senti l'urgence de revoir sa politique énergétique. Rapidement, elle a pris la décision de sortir du nucléaire d'ici à 2034, un choix qui nécessite la mise en place soit d'un programme de remplacement qui permettrait de répondre aux besoins du pays en matière d'électricité, soit une collaboration au niveau international afin de se spécialiser dans la production d'une énergie particulière pour ensuite créer un réseau d'échange international. Dans les deux cas, la Suisse doit se lancer dans la production d'une nouvelle énergie et tout tend à produire une énergie renouvelable.

Efficaces, neutres en CO<sub>2</sub>, énergies aux ressources inépuisables et aux coûts toujours plus avantageux, les énergies renouvelables ne demandent qu'à être développées. Parmi celles-ci, la biomasse, sous divisée en différents agents énergétiques – biogaz, biocarburants, bois-énergie – semble être l'énergie adaptée à la Suisse, pays très vert au potentiel énorme. La production d'énergie à partir de la biomasse pourrait s'intégrer à un programme énergétique établi selon une dimension locale et autarcique ou selon une vision favorisant la spécialisation par région et l'échange international.

La biomasse présente des atouts solides qui font d'elle une énergie renouvelable incontournable dans le monde. Ressource intarissable, énergie verte, source d'emploi et remède d'avenir, la biomasse est avant tout une ressource inépuisable et disponible dans le monde entier. Et pour cause, elle est exploitée à partir de ressources naturelles multiples telles que végétaux, animaux, déchets, etc...

La biomasse et les énergies renouvelables sont les remèdes de demain. Nous pouvons chauffer, rouler et être éclairé grâce à elles. C'est déjà un premier pas mais il reste encore beaucoup d'étapes à passer pour affirmer que la biomasse est l'alternative infaillible. Pour ce faire, organismes, politiques et autres institutions joignent leurs forces et impulsent le développement de la biomasse.

A ce jour, les performances du biogaz sont loin d'égaliser celles du nucléaire même si la recherche et les progrès permettent d'améliorer les résultats. Les conditions de production liées à ce développement à grande échelle engendrent d'autres problèmes environnementaux (déforestation, équilibre précarisé), économiques et sociaux (production céréalière intensive au détriment des cultures vivrières). C'est pourquoi la biomasse à elle seule ne peut remplacer le nucléaire. En revanche, couplée ou associée au développement d'autres énergies renouvelables, elle pourra contribuer en partie à cette sortie, au niveau national et international.



A gauche : Visite de la centrale nucléaire de Civaux EDF, France, 12 août 2012

A droite : Visite de la centrale de biogaz agricole de Villeronnens, Suisse, 5 mai 2012

## 4. Annexes

### Annexe 1 : unités de mesure

Il existe un nombre important d'unités utilisées pour signifier la même chose dans le domaine de l'énergie. Le tableau suivant ne pourra que simplifier la lecture de ce travail.

#### Energie

kWh = kilowattheure

MWh = mégawattheure ( $10^3$  kWh) = 1000 kWh

GWh = gigawattheure ( $10^6$  kWh) = 1 mio de kWh

TWh = térawattheure ( $10^9$  kWh) = 1 mrd de kWh

#### Puissance

kW = kilowatt ( $10^3$  watts)

MW = mégawatt ( $10^6$  watts) = 1000 kW

tep = tonne d'équivalent pétrole = 11 630 kWh

#### Facteurs de conversion

1 kWh =  $3,60 \cdot 10^6$  Joules (J)

1 J =  $277,8 \cdot 10^{-9}$  kWh

## Annexe 2 : compte rendu de la visite de biogaz agricole de Villorsonnens, Suisse



Coordonnées de l'entreprise Cotting & Fils  
SA

La société Cotting & Fils SA est une entreprise qui élève des porcs depuis une quinzaine d'années. Depuis 4 ans maintenant, cette société s'est tournée vers la fabrication du biogaz, y voyant un créneau qui lui offre une possibilité de diversifier son activité. En effet, le système permet d'exploiter le lisier de porc, complété par l'apport de fumier de cheval récolté dans les fermes voisines, du marc de café récupéré dans les usines Nestlé d'Avenches, des moutures des moulins environnants et des déchets alimentaires des restaurants de la région. De plus, depuis juillet 2011, les déchets alimentaires ne peuvent plus être donnés aux porcs comme aliments, ils doivent être éliminés voir recyclés contre paiement.

M. Damien Cotting, responsable biogaz sur le site, m'a reçue pour une visite guidée de l'exploitation. Au cours de cette visite, j'ai pu visualiser l'ensemble de la production et le principe d'exploitation.

L'exploitation se compose de :

- 1 porcherie avec 450 truies d'où est acheminé le lisier par des conduites vers la pré-fosse ;
- 1 halle où sont stockés séparément le fumier de cheval, le marc de café et les moutures des moulins (figure 1) ;
- 1 entrepôt qui réceptionne les déchets alimentaires, eux-mêmes traités, cuits à 70 °C puis broyés avant d'être mélangés aux autres déchets ;



Figure 1 : Halle de stockage des  
cosubstrats



- 1 pré-fosse où sont mélangés proportionnellement les divers déchets (lisier, marc, mouture, fumier et déchets alimentaires) ;
- 2 silos, des digesteurs qui reçoivent quotidiennement le mélange des déchets (figure 2). Le processus de méthanisation consiste à chauffer le mélange à 41° à l'aide de l'énergie produite sur place, à le brasser toutes les heures provoquant ainsi la fermentation et l'émanation des gaz, alors récupérés et acheminés par conduite vers deux moteurs. Le gaz est alors refroidi et filtré (élimination du sulfure) puis converti en courant électrique.
- 2 moteurs électriques (figure 3) qui génèrent l'électricité revendue à Swissgrid SA, Société nationale pour l'exploitation du réseau, qui garantit la rétribution à prix coutant (RPC) de l'électricité produite à partir de nouvelles énergies renouvelables.
- 1 local technique où toute la manutention du système se fait par ordinateur.



Figure 2 : deuxième digesteur



Figure 3 : deux moteurs électriques

Cette installation de départ a nécessité un investissement élevé qui sera amorti sur 10 ans. D'une part, le traitement des déchets alimentaires a un coût important puisqu'il faut collecter les déchets (un camion de l'entreprise passe prélever les containers qui seront lavés et désinfectés) et les cuire (un équipement pour les traiter : cuisson et broyage). D'autre part, le matériel étant sollicité 24 heures sur 24, il est mis à rude épreuve et demande un entretien régulier (1 service par mois pour les moteurs) et un renouvellement fréquent occasionnant de nouveaux frais (la durée de vie d'un moteur est de 6 ans). En revanche, l'eau chaude récupérée lors du refroidissement du gaz sert au traitement des déchets alimentaires. De même, les fournisseurs de ces déchets (restaurants, hôtels, cantines, hôpitaux, maison de retraite et autres sites de production) doivent verser une participation pour éliminer leurs déchets, finançant indirectement leur traitement sur site. L'installation n'est pas entièrement autonome puisqu'une chaudière à mazout vient renforcer le traitement des déchets alimentaires.

Globalement l'installation a une durée de vie de 20 ans, bien que ce chiffre soit approximatif, étant donné que ce type de production n'a pas encore fait ses preuves sur le long terme. De plus, sans le soutien financier de Swissgrid SA qui achète le courant 23 centimes le kWh au fournisseur, l'installation ne serait ni rentable, ni viable : Groupe E ne paie que 13 centimes du kWh.

La société Cotting & fils SA produit 2 millions de kWh par année. Il ne s'agit pas là d'une installation de biogaz agricole pure, le canton de Fribourg n'en compte qu'une à Bössingen pour l'instant. A ce jour, cinq autres installations de biogaz agricole sont en cours de construction dans le canton. Cet engouement pourrait susciter des problèmes de concurrence quant à l'approvisionnement en lisier, d'autant que la rétribution du biogaz agricole est élevée, Swissgrid SA l'achète entre 25 et 40 centimes du kWh. Enfin, les retombées suite à la loi interdisant l'affouragement porcin par des déchets alimentaires ne se sont pas encore faites ressentir. Seule la mise en place de contrôles réguliers pourrait inciter davantage les fournisseurs à recycler leurs déchets, assurant un avenir plus prometteur à l'installation.

## 5. Bibliographie :

### Liste des figures :

- Fig. 0 Page de couverture : *Remplacer le nucléaire par la biomasse*. Photomontage téléchargé le 10 mars 2013 du site d'OWNI,  
<<http://owni.fr/2012/03/18/voyage-au-centre-de-la-meuse-nucleaire-cigeo-andra/>>
- Fig. 1 *Les quatre étapes du processus de génération de biogaz*. Schéma tiré du livre *La production de biogaz*, p. 21
- Fig. 2 *Composition du biogaz*. Graphique téléchargé le 26 novembre 2012 sur le site d'AKAENO environnement  
<[http://akaeno.com/methanisation/methanisation\\_comment\\_ca\\_marche\\_en\\_savoir\\_plus.php](http://akaeno.com/methanisation/methanisation_comment_ca_marche_en_savoir_plus.php)>
- Fig. 3 *Potentiels méthanogènes des différents substrats*. Graphique tiré du document *La méthanisation en Poitou-Charentes VF.pdf*
- Fig. 4 *Déchets agricoles*. Tableau tiré du livre *La production de biogaz*, p. 15
- Fig. 5 *Déchets agro-industriels*. Tableau tiré du livre *La production de biogaz*, p. 15
- Fig. 6 *Déchets produits par l'industrie, l'artisanat et le commerce*. Tableau tiré du livre *La production de biogaz*, p. 16
- Fig. 7 *Influence de la température du digesteur sur la méthanisation et la production de biogaz*. Schéma tiré du *La production de biogaz*, p. 26
- Fig. 8 *Schéma d'une installation de méthanisation de déchets organiques*. Schéma téléchargé le 26 novembre 2012 du site d'EcoEnR,  
<<http://arketic.com/sites/ecoenr/la-methanisation-bio-gaz>>
- Fig. 9 *Evolution du prix et de la production d'électricité des différentes énergies renouvelables entre 2006 et 2050* WEINMANN-ENERGIE SA. Graphique tiré du document *Comment assurer l'approvisionnement électrique de la Suisse? Efficacité électrique, production renouvelable, nucléaire: comparaison des coûts*, p. 18
- Fig. 10 *Schéma les différents procédés de la production de biocarburant*. Schéma téléchargé le 12 décembre 2012 de la Plateforme biocarburants,  
<<http://www.plateforme-biocarburants.ch/infos/biogaz.php>>

Fig. 11 *La culture des sols pour les biocarburants fait concurrence à la culture vivrière.* Dessin de Chapatte, 2011, tiré du livre *Après Fukushima, quelles énergies pour demain ?*, p. 127

Fig. 12 *Plaquettes forestières.* Photographie téléchargée le 1<sup>er</sup> mars 2013 du site de bioenergie-promotion,  
<<http://www.bioenergie-promotion.fr/6361/referentiel-des-caracteristiques-des-plaquettes-forestieres/>>

Fig. 13 *Les piliers du développement durable.* Schéma téléchargé le 1<sup>er</sup> mars 2013 sur le site de Losinger-Marazzi,  
< <http://www.losinger-marazzi.ch/developpement-durable/>>

Fig. 14 *La production d'énergie nucléaire dans le monde et sa part dans chaque pays.* Carte téléchargée le 12 décembre 2012 sur le site de Nucléaire-nonmerci.net  
<<http://nucleaire-nonmerci.net/nucleairemonde.html>>

Fig. 15 *Les centrales nucléaires en Suisse.* Carte téléchargée le 8 mars 2013 sur le site de Swissinfo  
<[http://www.swissinfo.ch/fre/politique\\_suisse/L\\_arret\\_des\\_centrales\\_nucleaires\\_prendra\\_du\\_temps.html?cid=29940718](http://www.swissinfo.ch/fre/politique_suisse/L_arret_des_centrales_nucleaires_prendra_du_temps.html?cid=29940718)>

Fig. 16 *L'électricité d'origine nucléaire dans le monde en 2009 (térawatt-heures).* Graphique tiré du prospectus *Après Fukushima, quelles énergies pour demain ?*, p. 88

Fig. 17 *Stockage des déchets radioactifs.* Photographie téléchargée le 8 mars 2013 du site Gazettenucléaire.org  
<<http://www.gazettenucléaire.org/~resosol/contronucleaires/Nucleaire/controverses/2008/Allemagne-mine-de-sel.html>>

Fig. 18 *Le Conseil fédéral ne veut plus du nucléaire.* Dessin de Vincent L'Epée, 2011, tiré du livre *Après Fukushima, quelles énergies pour demain ?* p. 122

Fig. 19 *Les différentes énergies renouvelables.* Photographies téléchargées le 8 mars 2013 à partir des sites suivants :  
<<http://horizon-durable.ch/blogarticle-693-les-premiers-transports-a-energie-solaire.html>>  
<<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroelectricite>>  
<<http://ericjarrot.free.fr/petit-eolien-carte-des-vents-France.html>>

<<http://tpegeothermie11.e-monsite.com/>>

<<http://www.mewa-recycling.de/fr/installations/biogaz.html>>

Fig. 20 *Production d'énergie globale primaire*. Schéma tiré du livre *Après Fukushima, quelles énergies pour demain ?*, p. 129

Fig. 21 *Les prix de l'éolien et du photovoltaïque chutent*. Graphique tiré du livre *Après Fukushima, quelles énergies pour demain ?* p. 131

Fig. 22 *Croissance en % des énergies renouvelables dans les différents pays*. Tableau tiré du livre *Les enjeux de l'énergie après Fukushima*, p. 52

Fig. 23 *Potentiel des énergies renouvelables à l'horizon 2020*. Carte interactive de Philippe Rekacewicz et Laura Margueritte, octobre 2007, téléchargée le 1<sup>er</sup> mars 2013 du site Cartographier le présent

<<http://www.cartografareilpresente.org/article181.html>>

Fig. 24 *Approvisionnement en nouvelles énergies renouvelables*. Camembert téléchargé le 6 mai 2012 du site [électricité pour demain.ch](http://www.electricitepourdemain.ch)

<[http://www.electricitepourdemain.ch/fr/energies-renouvelables-\\_content---1--1039.html](http://www.electricitepourdemain.ch/fr/energies-renouvelables-_content---1--1039.html)>

Fig. 25 *La biomasse est neutre en CO<sub>2</sub>*. Schéma téléchargé le 8 mars 2013 du site [winforres.eu](http://www.winformes.eu)

< <http://www.winformes.eu/it/web/fr/pourquoi>>

Fig. 26 Photos conclusion et photos en annexe : *Visite de la centrale de Civaux*. Photographie personnelle réalisée à la centrale nucléaire de Civaux en France le 12 août 2012. *Visite de la centrale de biogaz de Villorsonnens, Coordonnées de l'entreprise Cotting & Fils SA, Halle de stockage des cosubstrats, Deuxième digesteur et Deux moteurs électriques*. Photographies personnelles réalisées à la centrale de biogaz agricole de Villorsonnens le 5 mai 2012.

### Les livres:

BASDEVANT, Jean-Louis. *Maîtriser le nucléaire*, Paris : Goupe Eyrolles, 2011, 233 p.

FONDATION GOODPLANET. *Après Fukushima, quelles énergies pour demain ? Un tour d'horizon en 85 dessins*, Paris : Ed. de la Martinière, 2012, 233p.

GORICH, Uwe ; HELM, Markus. *La production de Biogaz*, Paris : Ed. Ulmer, 2008, 120 p.

IACONA, Estelle ; TAINÉ, Jean ; TAMAIN, Bernard. *Les enjeux de l'énergie après Fukushima*, Paris : Ed. Dunod, 2012, 225 p.

INTERNATIONAL EMERGENCY AGENCY. *Energy Policies of IEA Countries, Switzerland, 2007 Rewied*, Paris : Ed. OECD/IEA, 2007, 121 p.

### Les documents et les prospectus:

Académie suisse des sciences naturelles SCNAT ; Académie suisse des sciences techniques SATW. *Sources d'énergie : chiffres et faits*. 2007, 10 p.  
<[www.scnat.ch/downloads/Energieressourcen\\_f.pdf](http://www.scnat.ch/downloads/Energieressourcen_f.pdf)>

Académie suisse des sciences techniques SATW ; BRAUN, Richard ; STUCKI, Gerhard ; KURATH, Monika. *Biocarburants – Opportunités et limites*, Zürich, 2009, 11 p.

Agence des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique AEE. *Energies renouvelables, tenir compte des avantages plutôt que des préjugés*. Berne, 2012, 35 p.

Agence des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique AEE. *La rétribution à prix coûtant du courant injecté (RPC)*, Berne, 2012, 25 p.

AUTO-SUISSE. *La consommation d'énergie et les émissions des voitures de tourisme*  
<[http://www.auto-schweiz.ch/dcs/users/2/Point\\_de\\_la\\_situation.pdf](http://www.auto-schweiz.ch/dcs/users/2/Point_de_la_situation.pdf)>

CANTON DE FRIBOURG. *Rapport agricole quadriennal aout 2009*, 2009, 69 p.  
<[http://www.fr.ch/sagri/files/pdf20/rapport\\_agricole\\_quadriennal\\_f11.pdf](http://www.fr.ch/sagri/files/pdf20/rapport_agricole_quadriennal_f11.pdf)>

CONFEDERATION SUISSE ; Chancellerie fédérale ChF. *Perspectives 2025, Analyse de la situation et du contexte pour la politique fédérale*, Berne, 2012, 67 p.

CONFEDERATION SUISSE ; Office fédéral de l'énergie OFEN ; Département fédéral de l'intérieur DFI. *Mémento statistique de la Suisse 2012*, Berne, 2012, 51 p.

CONFEDERATION SUISSE ; Office fédéral de l'énergie OFEN. *Energelia, Bulletin de l'OFEN numéro 1*, Berne, 2013, 17 p.

CONFEDERATION SUISSE ; Office fédéral de l'énergie OFEN. *La recherche énergétique relevant des pouvoirs publics en Suisse*, Berne, 2011, 41 p.

CONFEDERATION SUISSE ; Office fédéral de l'énergie OFEN. *Schweizerische Statistik der Erneuerbaren Energien, Ausgabe 2010*, Berne, 2011, 64 p.

CONFEDERATION SUISSE ; Office fédéral de l'énergie OFEN. *Statistique globale suisse de l'énergie 2010*, Berne, 2010, 61 p.

CONFEDERATION SUISSE ; Office fédéral de l'énergie OFEN. *Statistique suisse de l'électricité 2009*, Berne, 2009, 52 p.

EDF. *CNPE de Civaux EN BREF 2011*, Collection « nos énergies de l'avenir », Paris : 2011, 7 p.

EDF. *La gestion des déchets radioactifs*, Collection « nos énergies de l'avenir », Paris : 2011, 11 p.

EDF. *La déconstruction des centrales nucléaires*, Collection « nos énergies de l'avenir », Paris : 2011, 11 p.

EDF. *L'énergie nucléaire*, Collection « nos énergies de l'avenir », Paris : 2011, 11 p.

EDF. *L'EPR Flamanville 3*, Collection « nos énergies de l'avenir », Paris : 2011, 11 p.

EDF CIVAUX Centre Nucléaire de Production d'Electricité. Prospectus : *Découvrez le centre d'information du public*, Paris, 2011

EGGER, Francis ; INSTITUT AGRICOLE DE L'ETAT DE FRIBOURG. *Check-list biogaz*, 2009

<[http://www.fr.ch/iag/files/pdf26/check\\_list\\_procedures\\_installations\\_biogaz.pdf](http://www.fr.ch/iag/files/pdf26/check_list_procedures_installations_biogaz.pdf)>

FRIGAZ GAZ NATUREL. Prospectus : *Optez pour une énergie 100% naturelle, le biogaz : produit à Fribourg, renouvelable et neutre en CO<sub>2</sub>*, Givisiez, 2012

GREENPEACE. Prospectus : *Exigeons la transition énergétique en France maintenant !*

GROUPE E SA. Prospectus : *D'où provient mon électricité ? Et si vous passiez à une électricité 100% renouvelable ?*, Morat, 2012

MARCHAIS, Caroline ; Association technique énergie environnement ATEE. *Biogaz et méthanisation en France : lever les freins au développement de la filière*, 2010, 11 p.

<<http://media.xpair.com/pdf/energies-renouvelables/biogaz-developpement.pdf>>

SUISSE ENERGIE. *Des recettes éprouvées en vue de nouveaux horizons, 7<sup>e</sup> rapport annuel SuisseEnergie 2007/2008*, Berne, 2008, 26 p.

SUISSE ENERGIE. *Etat de la politique énergétique dans les cantons*, Berne, 2012, 88 p.

SUISSE ENERGIE. *Plateforme de l'avenir énergétique, 9<sup>e</sup> rapport annuel Suisse Energie 2009/2010*, Berne, 2010, 30 p.

SUISSE ENERGIE. *Programme de partenariat en faveur de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables*, Berne, 2007, 23 p.

SUISSE ENERGIE. *Rapport annuel 2011/2012*, Berne, 2012, 26 p.

WEINMANN-ENERGIE SA. *Comment assurer l'approvisionnement électrique de la Suisse? Efficacité électrique, production renouvelable, nucléaire: comparaison des coûts*, 2009, 56 p.  
<[www.securiteenergetique.ch/.../02\\_RAPPORT\\_WEINMANN\\_09.pdf](http://www.securiteenergetique.ch/.../02_RAPPORT_WEINMANN_09.pdf)>

2G KRAFT – WARME – KOPPLUNG AG. *Unités de cogénération au biogaz jusqu'à 3.000 kWel.*  
<[http://www.2-g.de/module/dateidownload/biogas\\_b.24\\_f\\_1.2.pdf](http://www.2-g.de/module/dateidownload/biogas_b.24_f_1.2.pdf)>

### Les articles :

ACKERMANN, Manuel ; LA POSTE. « Déchets organiques + purin + fumier = courant vert ». In *magazine de la Poste*, septembre 2012, p.27

ANONYME. « Le recul 11% ». In *20 minutes*, 28 mars 2012, p.12

ANONYME. « JAPON, Rapport d'enquête accablant sur la catastrophe de Fukushima ». In *La Liberté*, 6 juillet 2012

BONGARD, Tamara. « La centrale de biogaz de Grandvillard revue à la hausse ». In *La Liberté*, 14 juillet 2012

DUBOIS, Claudine. « Un projet de biogaz semble de trop ». In *La Liberté*, 10 mai 2012, p.15

FABRE ; Jules. « Débat sur nucléaire ». In *Citoyen Junior*, n°15, décembre 2011, p.18-19

GAILLET, Claude-Alain. « Les experts font parler leurs chiffres ». In *La Liberté*, 15 novembre 2012, p. 13

GUMY, Serge. « Des nuages sur le solaire en Suisse ». In *La Liberté*, 28 juillet 2012, p.3

GUMY, Serge. « Les impôts écologiques sont un échec ». In *La Liberté*, 15 novembre 2012, p. 3

GRANGET, Francis. « La biomasse du Mouret a mis les gaz ». In *La Liberté*, 6 août 2012, p.10

JORDAN, Samuel. « Energie verte en milieu fermé ». In *La Liberté*, 13 septembre 2012, p.11

NICOLET, Laurent. « Avec le nucléaire, le risque zéro existe ». In *Migros Magazine*, n°2, 7 janvier 2013, p.24-29

PIGUET, Christian. « L'énergie de fabrication est trop souvent négligée ». In *Le Temps*, 28 septembre 2012

TORNARE, Maud. « Centrale à biogaz de Bellechasse, Un pas de géant vers le renouvelable ». In *La Liberté*, 14 septembre 2012



VILLE DE FRIBOURG. « Fribourg s'active pour des énergies propres ». In 1700, n°282, février 2012, p.9

VIRDIS, Philippe ; GROUPE E. « Production d'énergie à partir de la biomasse ». In *Ito1 energy forum, le magazine de Groupe E*, janvier 2012, p. 11-13

VIRDIS, Philippe ; GROUPE E. « La force hydraulique ». In *Ito1 energy forum, le magazine de Groupe E*, février 2012, p. 5-17

WILLEMIN, Alexandre. « Energie verte : le produit d'avenir des paysans ». In *Migros Magazine*, n°40, 1<sup>er</sup> octobre 2012, p. 24-27

ZOELLIG, Marc-Rolland. « Le solaire a un potentiel gigantesque ! ». In *La Liberté*, 22 janvier 2013, p.25

### La webographie :

ACTEUR DURABLE. Consulté le 11 mars 2013. <<http://www.acteurdurable.org/>>

ARTHUS-BERTRAND, Yann ; GOODPLANET. Consulté le 11 mars 2013. <<http://www.goodplanet.org/>>

CONFEDERATION SUISSE ; Office fédéral de l'énergie OFEN. Consulté le 11 mars 2013. <[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)>

DAVID, Ascher ; ACTU-ENVIRONNEMENT.COM. Consulté le 11 mars 2013. <<http://www.actu-environnement.com/>>

DE BUMAN, Dominique ; SUISSE ENERGIE ; BIOMASSEENERGIE. Consulté le 11 mars 2013. <<http://www.biomasseschweiz.ch/>>

DECURTINS, Daniela ; Association Suisse de l'Industrie Gazière ASIG. Consulté le 11 mars 2013. <[www.gaz-naturel.ch](http://www.gaz-naturel.ch)>

ECOENR. Consulté le 11 mars 2013. <<http://www.eco-enr.com/>>

ENERGIE +. Consulté le 11 mars 2013. <<http://www.energieplus-lesite.be/>>

European Biogas Association EBA. Consulté le 11 mars 2013. <<http://www.european-biogas.eu/>>

IEA BIOENERGY. Consulté le 11 mars 2013. <<http://www.ieabioenergy.com/>>

Jean-Marie ; CONSOGLOBE. Consulté le 11 mars 2013. <<http://www.consoglobe.com/>>

LIEBARD, Alain ; OBSERVER. Consulté le 11 mars 2013.<<http://www.energies-renouvelables.org/part.html>>

MAGDELAINE, Christophe ; NOTRE-PLANETE.INFO. Consulté le 11 mars 2013. <[http://www.notre-planete.info/actualites/actu\\_2833\\_Tchernobyl\\_25000\\_morts.php](http://www.notre-planete.info/actualites/actu_2833_Tchernobyl_25000_morts.php)>

MULLER, Peter ; SUISSE ENERGIE ; ENERGIE-BOIS SUISSE. Consulté le 11 mars 13. <<http://www.energie-bois.ch/> >

WARTMANN, Otto ; OEKOSTROM SCHWEIZ. Consulté le 11 mars 2013. <<http://www.oekostromschweiz.ch/>>

### Visites

Visite de la centrale de biogaz agricole de Villorsonnens, le 5 mai 2012

Visite de la centrale nucléaire EDF de Civaux, France, le 12 août 2012

### Remerciements:

Je remercie Monsieur Bruno Guggisberg, responsable du département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC à l'Office fédéral de l'énergie OFEN dans le domaine de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables, pour son aide précieuse et pour les documents et informations qu'il m'a transmis.

Je remercie également Monsieur Damien Cotting, responsable Biogaz de la société Cotting & Fils SA, qui m'a fait visiter son exploitation et pour les explications qu'il m'a fournies.

Mes remerciements vont aussi à mon tuteur, Monsieur Laurent Bardy, qui m'a suivi tout au long de ce travail, tout comme à mes parents, qui ont corrigé l'orthographe et le français de celui-ci.