



UCL UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN

*Bilans énergétique et environnemental des filières de production
d'électricité. Aspects méthodologiques*

Working Paper n°2

Pépin Tchouate Heteu (UCL-GEB) et Léon Bolle (UCL-GEB)

Août 2002

Prix Tractebel 2001

« Contribution des certificats verts au développement de l'électricité renouvelable
dans un marché libéralisé »

Prof. L. BOLLE (GEB) et Prof. F. VARONE (AURAP)



Résumé du projet

L'objectif du projet est d'élaborer des outils d'analyse scientifique de la politique des certificats verts en Belgique et en Europe. La politique des certificats verts est un instrument de soutien à l'électricité verte qui repose sur la création d'un marché financier au sein duquel s'échangent des titres octroyés aux producteurs d'électricité certifiés. L'analyse scientifique sera conduite selon deux approches complémentaires: l'une, technico-économique, par le Groupe Energie Biomasse rattaché à l'Unité de Thermodynamique, Faculté des Sciences Appliquées; l'autre, politologique, réalisée par l'AURAP (Association Universitaire de Recherche sur l'Action Publique), Centre de recherche de la Faculté des Sciences Economiques, Sociales et Politiques.

L'approche technico-économique visera dans un premier temps à identifier de manière précise les principales filières vertes qui entreront en compétition sur le marché des certificats verts. Dans un deuxième temps, il s'agira de déterminer la rentabilité propre hors certificats verts de ces filières vertes et d'y associer un potentiel énergétique et un potentiel de réduction des émissions de CO2. Finalement, les courbes de rentabilité obtenues permettront de déterminer pour une valeur donnée du certificat vert, les filières vertes qui devraient émerger ainsi que le potentiel de réduction des émissions de CO2 correspondant.

L'approche politologique cherchera à analyser les instruments de politique énergétique visant à promouvoir l'électricité verte dans cinq pays européens : la Belgique, les Pays-Bas, le Danemark, la France et l'Allemagne. La recherche portera tout spécialement sur le choix des certificats verts en tant qu'instrument privilégié en Europe suite à la libéralisation du marché de l'électricité. Par ailleurs, l'accent sera mis particulièrement sur le rôle des principaux acteurs publics et privés du secteur électrique dans la définition de ces politiques.

Enfin, les deux approches contribueront à élaborer des scénarios d'harmonisation entre les différents systèmes de certificats verts au niveau belge et européen en identifiant les opportunités et les contraintes qui y sont liées.

Prof. L. Bolle
Unité de thermodynamique (TERM)
Groupe Energie Biomasse (GEB)
Place du Levant 2
1348 Louvain-la-Neuve
Tel : 010/47 22 09
Fax : 010/45 26 92
e-mail : bolle@term.ucl.ac.be

Prof. F. Varone
Unité de science politique et de relations
internationales (SPRI)
Association universitaire de recherche sur l'action
publique (AURAP)
Place Montesquieu 1, bte 7/8
1348 Louvain-la-Neuve
Tel : 010/47 42 74
Fax : 010/47 46 03
e-mail : varone@spri.ucl.ac.be

Pépin Tchouate Heteu (TERM/GEB)
Place du Levant 2
1348 Louvain-la-Neuve
Tel : 010/47 22 19
Fax : 010/45 26 92
e-mail : tchouate@term.ucl.ac.be

Isabelle de Lovinfosse (SPRI/AURAP)
Place Montesquieu 1, bte 7/8
1348 Louvain-la-Neuve
Tel : 010/47 41 34
Fax : 010/47 46 03
e-mail : delovinfosse@spri.ucl.ac.be

1. Introduction

La prise de conscience de l'effet de la consommation sur l'humanité a renforcé depuis la dernière décennie le souci de protection de l'environnement dans lequel nous vivons. La production d'énergie utile étant entre autres l'un des facteurs contribuant à la pollution de l'atmosphère de part les émissions qu'elle occasionne, l'utilisation rationnelle des ressources naturelles, sources d'énergie primaire, constitue l'une des mesures prises de part et d'autre dans le monde. Comment ceci est-il possible avec une demande toujours croissante en énergie et des réserves exploitables à prix raisonnables tendant vers l'épuisement? Ainsi, la recherche des solutions alternatives a été et reste très active, soit par l'augmentation des rendements des systèmes de production classique, c'est-à-dire alimentés par des sources primaires fossiles (gaz, charbon, pétrole, etc.) soit par l'utilisation des sources d'énergie renouvelables (solaire, éolien, biomasse) dont l'exploitation ne produit à priori pas des gaz à effet de serre. Par contre, des émissions sont produites pendant la construction de ces systèmes, lors du transport des matériaux et pendant le démantèlement à la fin de leur cycle de vie. Pour une comparaison objective des filières de production d'électricité, ces émissions doivent être prises en compte, d'où l'intérêt des bilan énergétique et environnemental. Il s'agit d'identifier et de quantifier les dépenses énergétiques et les impacts environnementaux sous-jacents à la production de 1 MWh d'électricité verte, qui constitue la base d'évaluation de la valeur d'un certificat vert émis.

Le tableau 1 décrit pour différentes filières énergétiques le degré d'implication de différentes phases dans les émissions des gaz nuisibles à l'environnement. Les degrés sont symbolisés par – pour pas d'implication ou implication négligeable et par + pour implication forte et ++ pour implication très importante. La comparaison est d'abord relative à l'intérieur d'une filière (lecture horizontale du tableau) et le résultat permet ensuite de faire une comparaison entre les filières (lecture verticale du tableau).

	Mise à disposition du combustible	Installation de transformation	Exploitation	Démantèlement
Fossile	++	-	++	-
Solaire, Éolien	-	++	-	+
Biomasse	++	+	-/+	+

Tableau 1 : Degrés d'implication des filières énergétiques dans les émissions de Gaz à effet de serre (GES).

Dès lors, une analyse LCA de chaque filière verte de production d'électricité doit être envisagée et permettra d'évaluer la contribution des certificats verts au développement des énergies renouvelables. L'analyse se réfère aux technologies qui contribueront davantage à la production d'électricité dans les années à venir. Il s'agit

principalement du solaire photovoltaïque, de l'éolien, de la gazéification et de la biométhanisation.

2. Méthodologie générale

L'évaluation du bilan énergétique et de l'impact environnemental d'une filière de production d'électricité nécessite l'analyse des différentes étapes du combustible, l'exploration, l'extraction, le conditionnement, le transport et les différentes étapes de la conversion énergétique dans les unités appropriées. Certaines étapes ultérieures telles la production des déchets et des co-produits et leur valorisation ou traitement sont souvent incluses. Pour chaque étape d'une filière donnée, les consommations énergétiques et les émissions associées sont évaluées. Ainsi, non seulement les émissions directes sont prises en compte mais aussi les émissions indirectes dues aux étapes en amont et en aval de la phase de la production d'électricité proprement dite. Dans ce travail, nous définissons les filières principales en fonction des technologies de conversion et dans la même filière principale, des filières secondaires peuvent être liées au type ou à l'origine de la matière première. Selon Edelman et al (2001¹) ainsi que DIN (1997²), une telle analyse comporte quatre étapes : la circonscription de la filière, le bilan matière, le bilan environnemental proprement dit et l'interprétation. Nous y ajoutons le bilan énergétique parce qu'il nous permet de calculer pour chaque filière le temps de retour énergétique qui est selon nous un critère important de décision.

Délimitation du système : L'analyse d'une filière ou d'un processus commence par sa description afin de pouvoir circonscrire les limites du système à étudier. En règle générale, il s'agit de délimiter le système en fonction des informations disponibles et présentant un intérêt pour l'analyse. La même filière peut être analysée différemment qu'il s'agisse d'une analyse comparative ou d'une évaluation globale. Cette circonscription des limites varie même pour le même système d'un auteur à l'autre et selon les pays, de même que les inputs aux différentes étapes du cycle (Lenzen, 2002)³. Cette situation n'est pas favorable à la comparaison et à l'interprétation des résultats. Dans cette étude, les systèmes vont se limiter à la construction, l'exploitation et au démantèlement des centrales ou unités de conversion. Ainsi vont être pris en considération les matériaux utilisés dans les différentes étapes ainsi que leur production et éventuellement le transport. Les infrastructures telles que les machines, les bâtiments, etc. ayant servi à la fabrication de ces matériaux tout comme les bureaux ne sont pas pris en compte. Les techniques de fabrication des matériaux sont celles courantes en Europe Centrale et les consommations d'électricité sont converties en énergie primaire en considérant soit le rendement moyen du parc électrique belge tel qu'il est aujourd'hui, soit le parc électrique du futur constitué de TGV à 55% de rendement. Certains matériaux sont recyclés lors du démantèlement des unités de conversion et peuvent être réutilisés dans d'autres secteurs de l'économie. Cette réutilisation entraîne une économie d'énergie primaire par rapport à l'utilisation de la matière première. Nous convenons de comptabiliser cette économie

¹ Edelman W. et al ; (2001) ; *Ökobilanz der Stromgewinnung aus landwirtschaftlichem biogas; Projekt 35408, Vertrag 75187, étude commandée par le „ Schweizerisches Bundesamt für Energie“.*

² Deutsches Institut für Normung : *DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement-Produkt-Ökobilanz-Prinzipien und allgemeine Anforderungen.* Beuth Verlag, Berlin 1997.

³ Lenzen M. et al. (2002) *Energy and CO2 life-cycle analyses of wind turbines--- review and applications; Renewable Energy 26 (2002) 339-362.*

d'énergie plutôt dans le procédé ou la filière qui utilisera ces matériaux recyclés et non de les soustraire dans la filière actuellement étudiée, ce qui permet d'éviter les double comptages. Ainsi, si un procédé ou une filière utilise de l'Aluminium, de l'acier, ou du cuivre recyclé, il en sera tenu compte dans l'évaluation.

Unités fonctionnelles

Le LCA peut être utilisé pour évaluer un seul projet ou pour comparer plusieurs projets offrant le même service. Dans le cas d'une production d'électricité verte, le projet est généralement comparé à un projet de référence basé sur l'utilisation des combustibles fossiles qu'il est censé remplacer. Dans ce cas, seuls les effets additionnels sont quantifiés et exprimés pour la durée du projet. Ainsi, il est possible d'évaluer les émissions évitées de GES par le nouveau projet. Lorsque le LCA est utilisé pour comparer plusieurs projets, il est nécessaire de définir une ou plusieurs unités fonctionnelles. Une unité fonctionnelle est une grandeur de référence à laquelle vont se rapporter toutes les données d'un bilan qu'il soit énergétique ou environnemental. Les effets environnementaux sont par conséquent exprimés sous la forme :

$$\text{indicateur environnemental } i = \frac{\text{effet environnemental}}{\text{unité fonctionnelle}}$$

Il arrive que dans une même filière, l'unité fonctionnelle dans les phases de construction, d'exploitation et de démantèlement des installations soit différente de celle liée à la phase de production d'électricité. Dans la filière biométhanisation par exemple, les unités fonctionnelles généralement utilisées sont la quantité de substrats traitée annuellement par m³ du digesteur et le TJ électrique produit par le cogénérateur à partir du biogaz.

Bilan matière et énergie : il s'agit de faire l'inventaire des matériaux entrant dans la construction et l'exploitation de l'installation et d'évaluer à chaque étape de la filière les inputs et les outputs. Ceci permet d'évaluer les quantités d'énergie consommées lors de leur fabrication et de leur transport jusqu'au lieu de l'utilisation. On utilise pour cela des ratios. Les deux principales formes d'énergie utile considérées sont l'électricité et la chaleur bien que dans certaines analyses on comptabilise « l'énergie de la matière » (feedstock energy), c'est-à-dire le pouvoir calorifique de la matière utilisée comme source d'énergie (energy carrier). Cette dernière est parfois négligeable dans divers procédés par exemple pour la fabrication des modules PV (Hagedorn et al., 1992)⁴. Toutes les consommations d'énergie seront converties en équivalent énergie primaire. Il peut arriver qu'un processus ait deux ou plusieurs coproduits. Dans ce cas l'énergie consommée doit être allouée aux différents produits. Les méthodes d'allocation sont soit basées sur la valeur économique ou autre paramètre exprimant la qualité de chacun des produits, soit sur leur masse, soit toute l'énergie est allouée au produit principal. Dans cette étude, nous optons pour une allocation – lorsque c'est possible - par rapport aux masses des différents produits. Le bilan énergétique inclut le calcul du temps de retour énergétique des systèmes, défini comme le rapport entre l'énergie totale (E_{input}) consommée par la construction du système et sa production annuelle ($E_{annuelle}$). Cet indicateur exprime la période

⁴ Hagedorn G, Hellriegel E., 1992; *Umweltrelevante masseneinträge bei der Herstellung verschiedener Solarzellentypen – Endbericht Teil 1: konventionelle Verfahren, Forschungstelle für Energiewirtschaft, München, Germany.*

pendant laquelle un système énergétique produit l'énergie équivalente à celle qui a servi à sa mise en place.

$$TRE = \frac{E_{input}}{E_{annuelle}}$$

Dans le **bilan environnemental**, on identifie et quantifie les différents types d'émissions de manière à en évaluer l'impact sur les catégories de dégâts (effet de serre, destruction de la couche d'ozone, acidification et eutrophisation des sols et des eaux, etc.). Les émissions varient en fonction des sources d'énergie inventoriées dans la phase précédente.

Interprétation : Les émissions obtenues dans la phase précédente peuvent être ramenées pour chaque catégorie de dégât sous une forme commune qui facilite la comparaison avec d'autres filières ou avec une filière de référence afin d'en juger l'impact sur l'environnement. Par exemple, dans la catégorie « Effet de serre », on définit le Potentiel de Réchauffement Global (PRG) ou Global Warming Potential (GWP) par le CO₂ équivalent qui tient compte de la capacité de chacun des gaz à contribuer au réchauffement de la planète. IPCC recommande les valeurs suivantes qui prennent en considération l'effet des différents polluants sur une période de cent ans (IPCC, 1995)⁵:

$$1 \text{ CH}_4 = 21 \text{ CO}_2 \text{ éq} \quad 1 \text{ N}_2\text{O} = 310 \text{ CO}_2 \text{ éq} \quad 1 \text{ CO}_2 = 1 \text{ CO}_2 \text{ éq}$$

Le protocole de Kyoto inclut aussi dans la liste des gaz à effet de serre, le HFC, le PFC et le SF₆. Bien que leur potentiel de réchauffement global soit très élevé, ils sont émis en de très faibles quantités au point que leur contribution peut être négligée globalement.

Aussi le SO₂ équivalent, résultant du SO₂, du NO_x, du NH₃ et du HCl, est une grandeur caractéristique de l'acidification des sols et des eaux. Le calcul du SO₂ équivalent considère les valeurs suivantes ⁶:

$$1 \text{ HCl} = 0,88 \text{ SO}_2 \text{ éq} \quad 1 \text{ NO}_x = 0,7 \text{ SO}_2 \text{ éq} \quad 1 \text{ NH}_3 = 1,88 \text{ SO}_2 \text{ éq} \quad 1 \text{ SO}_2 = 1 \text{ SO}_2 \text{ éq}$$

De même, le NO_x, le NH₃ et le Phosphate (P) peuvent être converties en PO₄⁻³ équivalent pour caractériser l'eutrophisation des sols et des eaux.

On peut dès lors établir de manière scientifique un « profil environnemental » qui puisse favoriser l'interprétation des résultats obtenus. Ce profil s'obtient par pondération des différentes émissions et catégories de dégâts et permet d'évaluer la performance globale d'une filière. Les facteurs de pondération sont fonction des hypothèses et parfois du domaine d'application des résultats de l'analyse.

Avant de passer aux différentes filières de production d'électricité renouvelable, il convient de rappeler l'objectif d'une étude LCA. Il s'agit principalement d'un outil d'aide à la décision que ce soit lors de la définition des stratégies de planification, d'une décision politique ou du développement et amélioration d'un produit. Il apparaît dès lors important de prendre en considération les évolutions technologiques

⁵ IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories, Volume 3 Greenhouse gas inventory reference manual, Geneva 1995.

⁶ Martin Kaltschmitt: Ökobilanzierung zukünftiger Techniken zur Nutzung regenerativer Energien; Communication personnelle

susceptibles de survenir dans les différentes filières, tout en se limitant aux paramètres qui aujourd'hui ont une influence importante sur le système considéré. Pour les étapes en amont de l'unité de conversion, les paramètres utilisés seront ceux annoncés dans la littérature, par exemple dans la chaîne d'approvisionnement de la biomasse ou les prévisions sur l'évolution de la consommation spécifique d'énergie lors de la production des tranches de Si pour le solaire PV. L'optimisation se limitera en outre aux technologies mûres et maîtrisées. Ainsi, les nouvelles technologies comme les éoliennes munies des générateurs synchrones à excitation permanente ne seront pas prises en considération dans cette étude. La consommation énergétique lors de la fabrication des matériaux ayant un impact très important sur les résultats de l'analyse, l'évolution du parc tel que prévoit Electrabel⁷ pourra être prise en compte avec 3 scénarios : aujourd'hui, à moyen terme (2010) et à long terme (2020).

⁷ *ELECTRABEL est l'entreprise responsable de la production, transport et distribution d'électricité en Belgique*

3 *La Filière éolienne*

La filière éolienne consiste à produire de l'électricité en transformant l'énergie cinétique du vent sous l'action des turbines. La filière peut être décrite comme à la figure 1 partant depuis l'extraction des matières premières qui servent à la fabrication des matériaux rentrant dans la construction des éoliennes, l'exploitation des éoliennes de leur démantèlement en fin de cycle de vie et de la mise en rebut des matériaux.

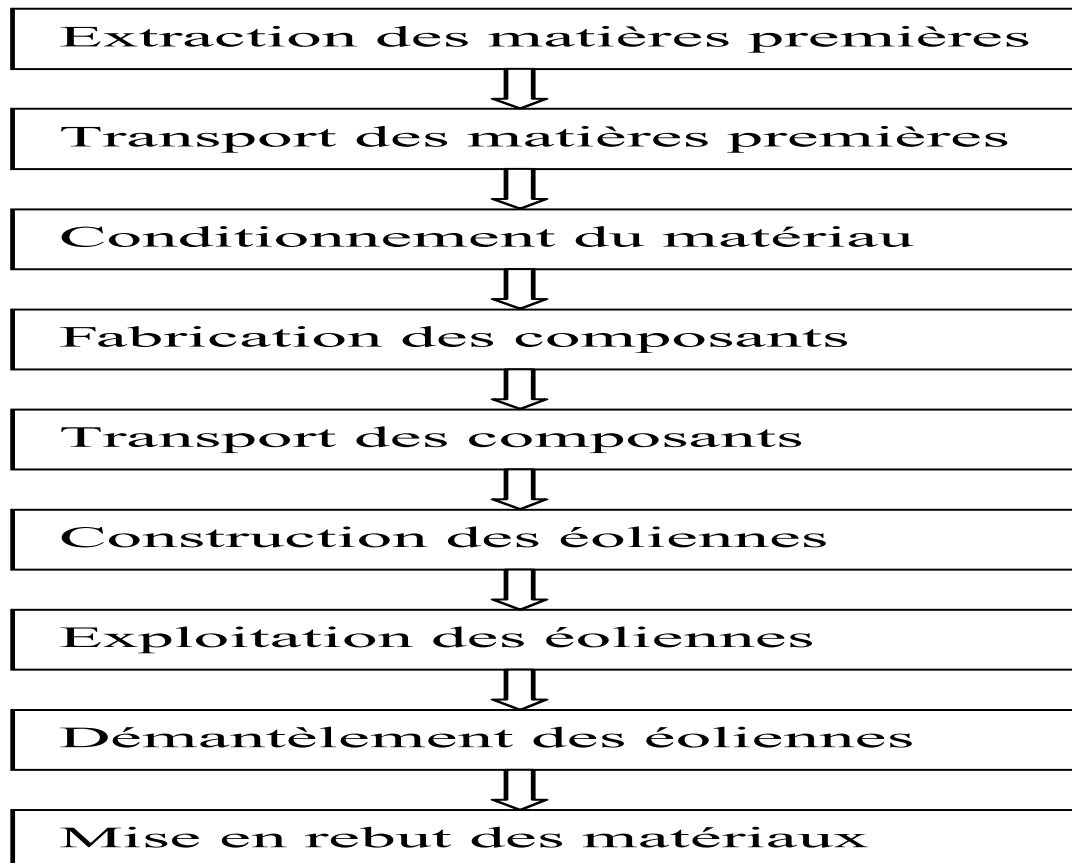


Fig.1 : Etapes du cycle de vie d'une éolienne

Deux systèmes sont analysés dans cette étude, l'éolienne offshore et l'éolienne onshore, chacune d'une capacité nominale de 1,5MW ayant un mât en acier d'environ 85m de hauteur, muni d'un rotor à trois pâles en fibres de verre renforcées. La fondation de l'éolienne onshore est un amas de béton renforcé et l'éolienne offshore est montée sur une structure massive en béton et acier renforcé, telle que généralement utilisée pour des fonds marins à des profondeurs de 10 à 20 mètres. Les structures en acier (pylônes) appropriées pour des profondeurs de 25m, les tripodes (profondeur supérieure à 25 mètres) et les structures flottantes ne sont pas considérées. Pour la centrale offshore, on tient compte du câble électrique marin Haute Tension (HT) qui sert au transport de l'électricité jusqu'à la cabine située à terre. La cabine HT ne fait pas partie du système étant donné qu'il est commun à tous les systèmes de production d'électricité de même puissance.

Bilan matière

Le tableau 2 présente l'inventaire des matériaux qui ont servi à la construction des deux éoliennes estimés à partir des données relatives à deux parcs à éoliennes installés au Danemark, l'un offshore composé de 10 centrales à 500kW, l'autre onshore composé de 18 centrales de 500kW (Schleisner, 2000)⁸.

Matériaux	Eolienne offshore [1,5 MW; mât 85m; 3 pâles]	Eolienne onshore [1,5 MW; mât 85m; 3 pâles]
Mâts		
Acier	89590	89590
Aluminium	2380	2380
Cuivre	595	595
Sable	3570	3570
Verre	1870	1870
Plastiques (polyester et résine)	3400	3400
produits pétroliers	170	170
autres	1190	1190
Fondation		
reinforced iron	40800	2040
béton	960500	480250
Câbles marins		
Cuivre	4386	
Plomb	5712	
Acier	6630	
PEX	918	

Tableau 2 : Inventaire des matériaux utilisés pour la construction des éoliennes, exprimées en kg

Bilan énergie

Le tableau 3 montre la quantité d'énergie consommée pour la construction et le démantèlement des matériaux qui ont servi à construire les éoliennes. On a considéré une consommation identique pour le sable et le ciment. La fabrication des pales nécessitent l'utilisation des fibres de verre, eux fabriqués à partir du verre et du polyester. Par manque de données, seules les consommations énergétiques pour la fabrication du verre et du polyester ont été pris en compte.

Valeurs en GJp	Eolienne offshore [1,5 MW; mât 85m; 3 pâles]	Eolienne onshore [1,5 MW; mât 85m; 3 pâles]
Acier	2298	2298
Reinforced iron	1179	59
Aluminium	93	93
Cuivre	390	47
Plomb	203	0
Plastiques	155	155
Verre	17	17
béton et sable	3548	1780
Total	7884	4450

Tableau 3 : Energie consommée avant la mise en service de l'éolienne

⁸ Schleisner L., 2000, *LCA of wind farm and related externalities*, *Renewable Energy* 20, pp 279-288.

A la fin de la durée de vie de la turbine (offshore, respectivement onshore), on considère que 4% de l'énergie totale consommée, respectivement 2,5% sont nécessaires pour la mise en rebut des matériaux. Il vient alors comme énergie primaire consommée 8200 GJ (offshore) et 4561 GJ (onshore).

En supposant pour chacun des parcs une durée annuelle de fonctionnement de 2500h pour l'offshore et 1550h pour l'onshore, on obtient une production annuelle d'électricité de 3750 MWh en offshore et 2325 MWh en onshore. Les quantités d'énergie primaire qui aurait été consommée par un parc de centrales avec un rendement équivalent de 40% sont respectivement 33 750 GJp et 20925 GJp.

Le temps de retour énergétique est de 3 mois (offshore) et 2,6 mois pour l'éolienne onshore. Si on prend pour référence une centrale TGV à 55% de rendement, le temps de retour énergétique est respectivement d'environ 4 mois et 3,6mois.

Bilan des émissions

Les deux tableaux suivants montrent les émissions globales des deux parcs à éoliennes, calculées à partir des valeurs spécifiques d'émissions et des types et quantités de matériaux utilisés.

Les émissions spécifiques dues à l'utilisation de ces matériaux sont résumées dans le tableau 4. Elles ont été calculées en fonction des énergies consommées pour la fabrication et le transport de ces mêmes matériaux.

Matériaux \ Emissions	SO2	Nox	CO2	N2O	CH4	NM VOC	CO
Acier	12 - 17	8 - 11	1871 - 2742	0,06 - 0,08	0,03 - 0,05	0,15 - 0,17	0,88 - 0,98
Aluminium	18 - 24	11 - 15	2866 - 4001	0,09 - 0,12	0,05 - 0,08	0,13 - 0,16	0,67 - 0,82
Cuivre	35,61	23,19	6536	0,19	0,16	0,25	1,57
Plastiques (polyester et résine)	22,91	14,71	3941	0,12	0,08	0,2	1,1
PVC	14,75	10,49	3113	0,09	0,08	0,2	1,04
Caoutchouc	16,06	10,61	3398	0,1	0,06	0,18	1,06
Reinforced iron (rebars)	14,58	8,89	3114	0,09	0,06	0,18	1,57
béton	0,01	2,5	703	0	0	0	0
Plomb	18,19	19,82	2953	0,11	0,07	0,55	2,03
Zinc	47,49	35,66	6653	0,23	0,12	0,6	2,39
Float glass	0,87	2,41	581	0,01	0,04	0,15	0,66
Packing glass	1,58	2,48	551	0,01	0,03	0,14	0,64
Isolation, laine de roche (/m3)	6,08	2,82	1042	0,03	0,02	0,06	0,82
Isolation, laine de verre (/m3)	4,98	3,96	1008	0,03	0,03	0,08	0,36

Émissions par kg de matériaux utilisé [en g]

Tableau 4 : Emissions spécifiques liées à la fabrication de divers matériaux.

De même, les émissions dues à la mise en rebut des matières plastiques, du PVC et du caoutchouc issus du démantèlement d'une éolienne sont résumées dans le tableau 5.

Matériaux \ Emissions	SO2	Nox	CO2	N2O	CH4	NMVOC	CO
Plastiques (polyester et résine)	3,6	6	4680	0,16	0,24	0,36	87,52
PVC	3,6	6	4680	0,16	0,24	0,36	87,52
Caoutchouc	1,8 - 3,6	3 - 6	2340 - 4680	0,08 - 0,16	0,12 - 0,24	0,18 - 0,36	43,8 - 87,5

Émissions par kg de matériaux mis en rebut [en g]

Tableau 5: Emissions spécifiques liées à la mise en rebut de divers matériaux.

Tableau 7: Emissions globales de la centrale offshore [tonnes]

Matériaux \ Emissions	SO2	Nox	CO2équiv.	NMVOC	CO
Acier	1,395	0,914	224	0,015	0,089
Reinforced iron	0,595	0,363	128	0,007	0,064
Aluminium	0,050	0,031	8	0,000	0,002
Cuivre	0,177	0,116	33	0,001	0,008
Plomb	0,104	0,113	17	0,003	0,012
Plastiques	0,078	0,050	14	0,001	0,004
Verre	0,003	0,005	1	0,000	0,001
béton et sable	5,862	2,719	1014	0,058	0,791
Total	4,132	2,155	1439	0,086	0,970

NB: Dans les tableaux 7 et 8 les émissions de Nox et de SO2 sont diminuées de moitié en supposant que les centrales sont munies de De-NOX et De-SOX

Tableau 8: Emissions globales de la centrale onshore [tonnes]

Matériaux \ Emissions	SO2	NOx	CO2équiv.	NMVOC	CO
Acier	1,30	0,85	208,66	0,01	0,08
Reinforced iron	0,03	0,02	6,41	0,00	0,00
Aluminium	0,05	0,03	8,25	0,00	0,00
Cuivre	0,02	0,01	3,93	0,00	0,00
Plomb	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Plastiques	0,08	0,05	13,53	0,00	0,00
Verre	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
béton et sable	2,94	1,36	508,84	0,03	0,40
Total	2,21	1,16	750	0,04	0,49

On en déduit une émission de CO2 équivalent de 19,2g/kWhélect pour le parc offshore et 16,13g/kWhél pour le parc onshore, ce qui équivaut à une émission de moins d'un gramme de Carbone par kWh d'électricité produite par les centrales éoliennes.

4 Le solaire Photovoltaïque

Le système PV (figure 2) est composé d'une structure servant de support et d'un générateur PV, lui-même comprenant

- un champ de modules captant l'énergie solaire et la transformant en énergie électrique,
- le Balance of System (B.O.S): un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications de la charge. Si le générateur PV est connecté à un réseau, le BOS est composé d'un onduleur et des fusibles. S'il alimente par contre un réseau isolé, ce qui ne fait pas partie de notre étude, le BOS comprend en plus un régulateur de charge et un accumulateur pour le stockage de l'électricité.

Un système PV peut être caractérisé par la technologie de production de modules, la structure de support, l'application envisagée (connectée au réseau électrique ou autonome), l'ensoleillement du site et le rendement du système.

La structure de support varie selon qu'il s'agisse d'une installation domestique ou d'un champ de modules à grande puissance alimentant un réseau.

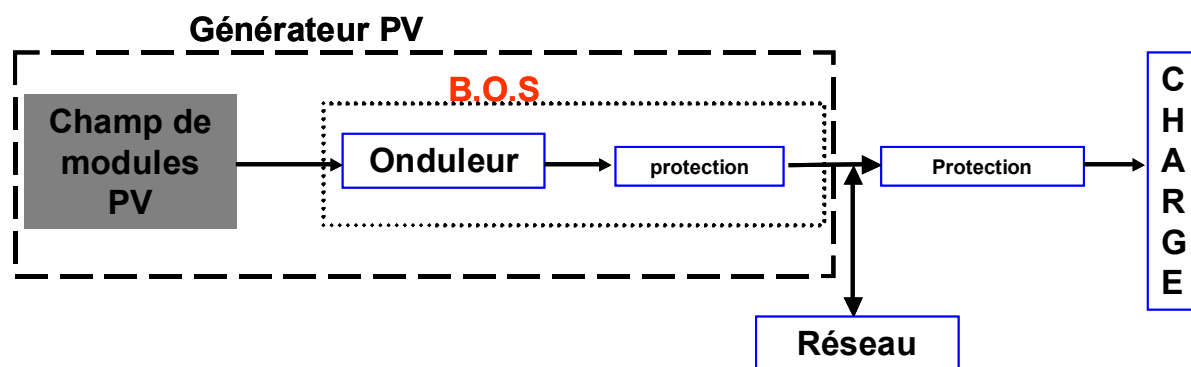


Figure 2 : Schéma d'un système PV

Processus de fabrication des modules

L'analyse du processus de fabrication des modules PV est dès lors essentielle pour l'évaluation des émissions et consommations énergétiques de cette filière. Ce processus est schématisé aux figures 3 et 5. Tout d'abord, nous allons décrire ci-dessous le processus pour les modules à base du silicium cristallin qui est la technologie dominante le marché actuel. Le rendement actuel de conversion énergétique est d'environ 13% pour les modules à base de silicium polycristallin et d'environ 14% pour ceux à base de silicium monocristallin:

1. **Production du silicium « métallurgique » MG-Si** : le silicium métallurgique (MG-Si) est produit dans des grands fours à une température d'environ 1200°C soit par réduction du quartz (SiO_2) avec du carbone, ($SiO_2 + 2C \rightarrow 2CO + Si$), soit par réduction aluminothermique ($3SiO_2 + 4Al \rightarrow 2Al_2O_3 + 3Si$). Dans le premier cas, les sources d'énergie telles le charbon, le charbon de bois et les chips de bois sont utilisées comme réducteurs. Lors de cette étape, le CO est oxydé et émis dans

l'atmosphère sous forme de CO₂. Les valeurs correspondant à la production d'une tonne de MG-Si sont résumées dans le tableau 1.

2. **Production du silicium électronique pur - polycristallin (poly-Si) fin** - : le silicium métallurgique doit être purifié lors du processus « Siemens » pendant lequel il est chloré avec du HCl pour obtenir 90% de SiHCl₃ (méthode trichlorosilane : $Si + 3HCl \rightarrow SiHCl_3(gaz) + H_2$) et 10% de tétrachlorure de silicium (SiCl₄) qui est une matière première pour la fabrication des fibres de quartz et de pigment. Ensuite le silicium purifié en phase gazeuse est reprécipité à 1100-1200°C en silicium polycristallin. Dans d'autres procédés tels la « méthode monosilane », le SiH₄ est utilisé.
3. **Production du silicium monocristallin (c-Si)**: le c-Si est fabriqué à partir du poly-Si selon la technique de Czochralski. Les fines particules de silicium sont fondus et maintenus liquides dans un creuset en silice (quartz). A environ 1400°C, les cylindres de c-Si sont obtenus par tirage avec un contrôle minutieux de la température, de la vitesse et de l'atmosphère gazeuse et refroidis spontanément. Les extrémités des cylindres sont coupées car leur qualité est insuffisante pour une utilisation comme semi-conducteurs mais suffisante pour la fabrication des cellules PV. Ces extrémités représentent en poids 15 à 20% du lingot. La consommation d'électricité pour la production d'une tonne de lingot (semi-conducteur + cellules PV) est estimée à 240 – 320 MWh. D'autres méthodes permettent à ce stade de fabriquer directement des blocs de silicium polycristallin par solidification directionnelle.
4. **Du silicium cristallin au substrat** : Les extrémités prévues pour la fabrication des cellules ou les blocs de silicium multicristallin solidifiés sont ensuite découpés en tranches de 350 µm d'épaisseur et d'environ 100 cm² de superficie à l'aide des scies multilames. 50 à 60% en poids peuvent ainsi être récupérés en tranches, les parties inférieures et supérieures étant recyclées. Ces tranches ou substrats servent de matériau de base pour la fabrication proprement dite de la cellule solaire. Pour la production d'une tonne de tranches de c-Si, l'électricité consommée est estimée à 210 MWh.
5. **Du substrat au module PV** : les tranches sont dopées dans un four à diffusion pour réaliser les jonctions p-n et assemblées en cellules PV en formant les électrodes. Les cellules PV sont ensuite montées, laminées et couvertes avec une feuille de verre et mises dans un cadre en aluminium.

Les modules PV à couche mince

La fabrication des modules à couche mince diffère significativement de celle décrite ci-dessus, d'où l'intérêt de les traiter séparément. En général, les modules à couche mince sont fabriqués en déposant une couche mince (0,5 à 10 µm) d'un matériau semiconducteur (silicium, CdS/CdTe, etc.) sur un substrat, généralement une plaque en verre. Différentes techniques permettent ce dépôt, parmi lesquelles l'évaporation, le dépôt électrolytique, le dépôt par bain chimique et le dépôt par vaporisation chimique. En fonction de la technique utilisée, les propriétés du matériau, sa vitesse d'utilisation et la consommation énergétique du processus vont varier. Les procédés utilisant des températures élevées et/ou des conditions à vide consomment généralement plus d'énergie par m² de substrat traité.

Les contacts sont ensuite déposés par vaporisation chimique pour les contacts transparents et par évaporation pour les contacts noirs. Les cellules solaires ainsi obtenues sont couvertes d'une deuxième plaque de verre ou d'un voile en polymère. En fonction de l'application et du fabricant, le module peut rester sans cadre ou être encadré dans de l'aluminium ou du polymère. A chaque étape du procédé de fabrication, la cellule entière du module (0,5 à 1 m²) est traitée. Deux types de cellules à couche mince existent sur le marché : celles utilisant le silicium amorphe et celles au CdS/CdTe. La première est plus connue actuellement sur le marché avec des valeurs de rendement comprises entre 5 et 8% alors que la deuxième est en plein essor au Japon. La figure 3 décrit le processus de fabrication des cellules PV à couche de CdS/CdTe.

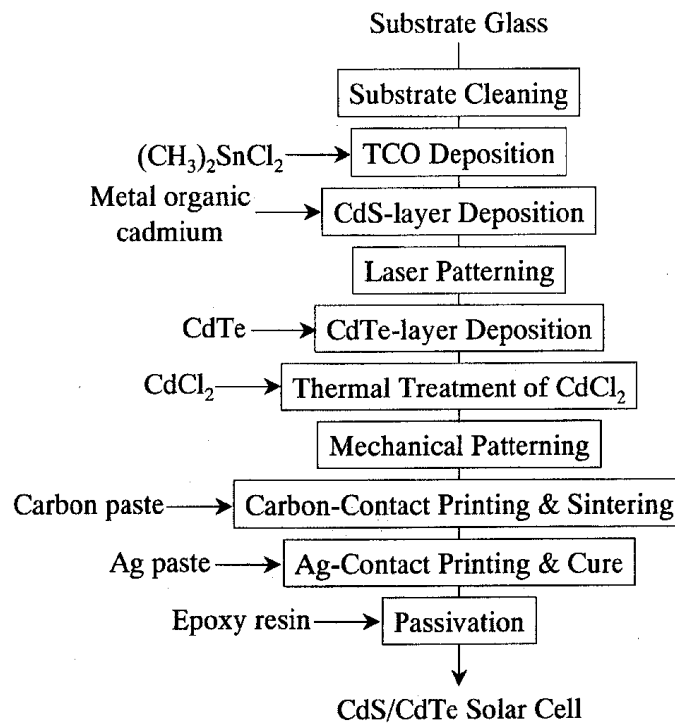


Fig. 3 : Etapes de la fabrication des cellules PV à couche de CdS/CdTe (Kato et al, 2000)

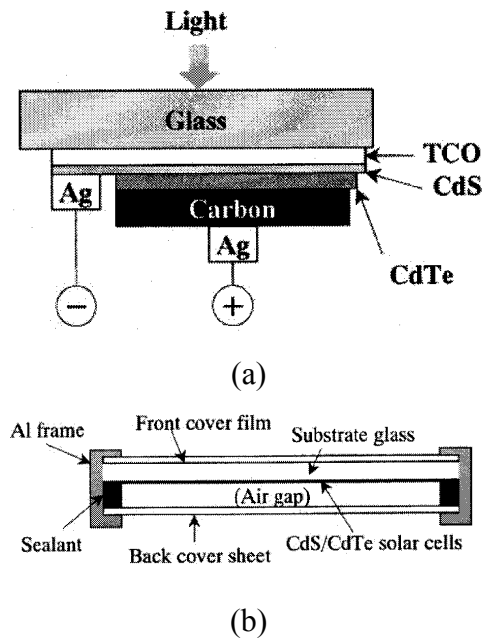


Fig. 4 : Schéma (a) et structure (b) d'une cellule PV à couche de CdS/CdTe (Kato et al, 2000)

Unités fonctionnelles

En parcourant la littérature, on remarque que plusieurs unités fonctionnelles ont été utilisées pour l'évaluation du bilan énergétique de la filière de production d'électricité photovoltaïque :

- le kWh d'électricité produite,
- le Wc du module PV,
- le m² du module,
- le m² de la cellule,
- le module

Les deux premières sont les plus usuelles malgré l'inconvénient désavantage de devoir intégrer des paramètres (ensoleillement, rendements) n'ayant que très peu de relation avec la consommation d'énergie pendant la fabrication des modules, beaucoup plus liée à la superficie du module ou de la cellule. La différence entre le m² de module et le m² de la cellule n'a de sens profond pour la technologie basée sur le silicium cristallin (Alsema, 1998). Le module selon nous est une unité difficilement utilisable car le secteur n'ayant pas encore défini les dimensions et puissances standardisées.

Dans cette étude, nous utiliserons le m² du module pour exprimer les besoins énergétiques du processus de fabrication que nous convertirons en kWh d'électricité produite ou en Wc du module PV lorsqu'il faudra calculer les émissions spécifiques ou le temps de retour énergétique.

Délimitation du système d'étude

Dans les analyses de la production des modules PV, il ne sera pas pris en compte la production des matériaux connexes comme les gaz porteurs et de purge, les fluides de lavage, les solvants, etc. pour deux raisons principales : la consommation de ses matériaux est relativement faible et les données ne sont pas disponibles. Il en est de même pour les données relatives à la maintenance, le démantèlement et la mise en rebut des installations PV. Etant donné que la production et l'utilisation des modules ont lieu en Europe et souvent dans le même pays, il ne sera pas tenu compte du transport des modules. Pour les systèmes domestiques, le coût énergétique de la phase d'installation du système sera négligé mais il doit être pris en compte pour les grandes centrales.

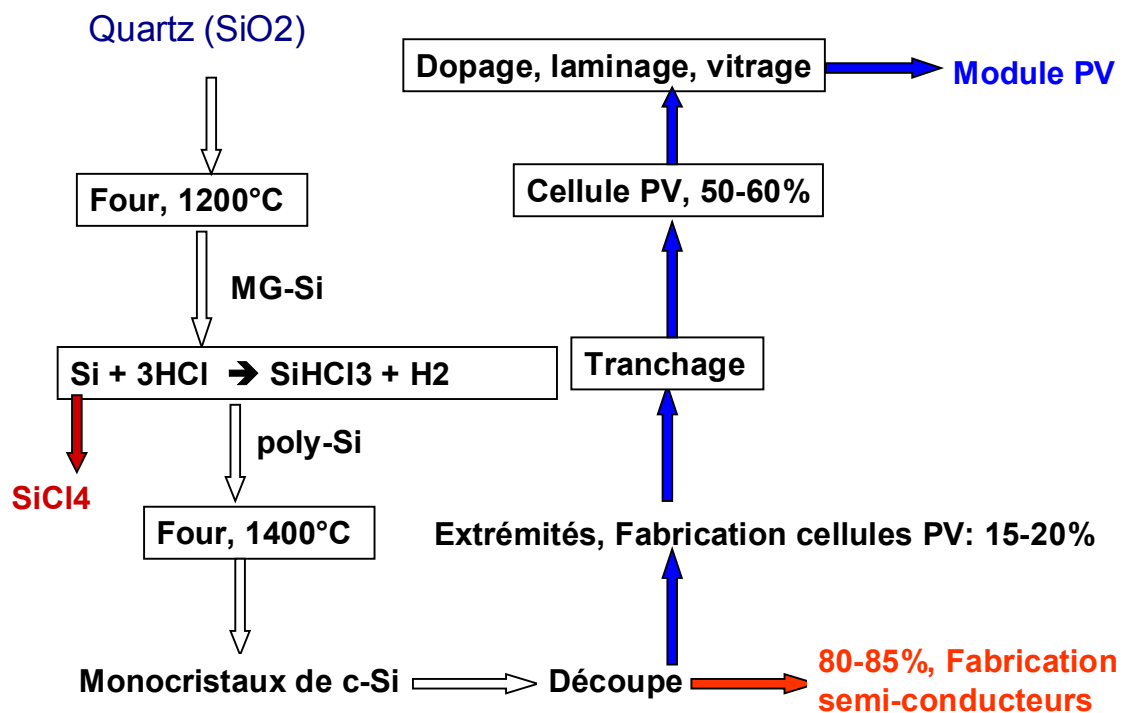


Fig. 5 : Schéma du processus de fabrication d'un module PV

Bilan matière

La figure 6 présente le bilan matière d'une installation domestique de puissance égale à 3 kWp. Ce schéma a été simplifié et ne sont représentées que les données essentielles à l'évaluation de chaque étape du processus.

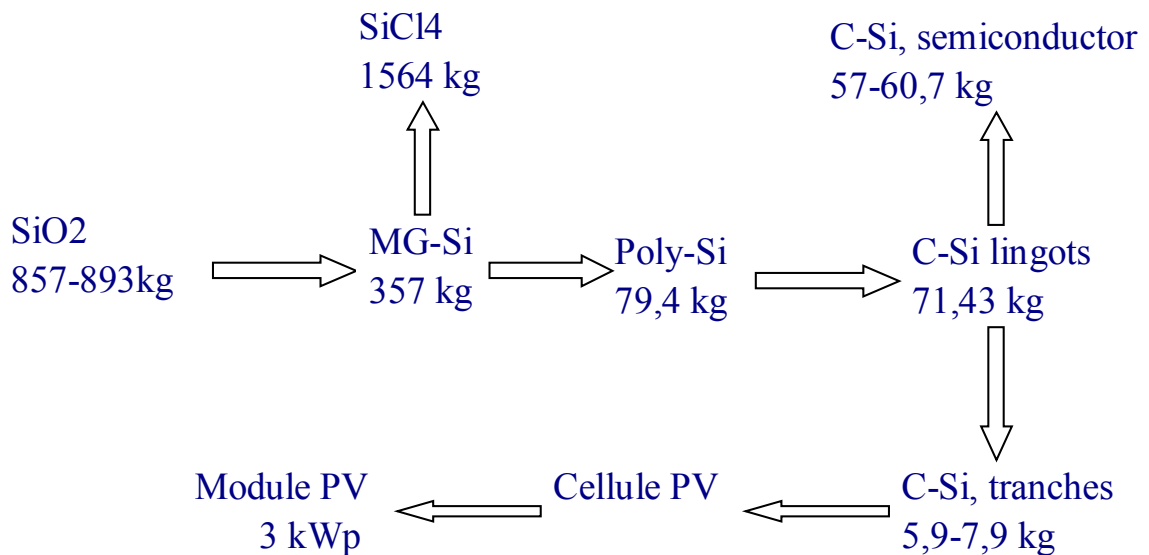


Fig. 6 : Schéma simplifié des flux de matières entrant dans la fabrication d'une installation PV

Bilan énergétique

Le bilan énergétique et le bilan CO₂ de cette installation tiennent compte de la structure supportant l'installation sur le toit et l'onduleur.

Trois options sont prises en considération (Kato et al, 1997):

Dans l'option 1, toutes les émissions et consommations des étapes 1 et 2 sont allouées à la fabrication du silicium polycristallin. Dans ce cas, on doit ajouter celles dues pour la production du « off grade silicon » à partir du quartz.

Dans la deuxième option, le SiCl₄ est considéré comme un co-produit du processus de fabrication du poly-Si. Dans ce cas, les consommations et émissions dues à cette étape sont allouées proportionnellement au poids du Si et on ignore la fraction allouée au SiCl₄.

Dans l'option 3, le c-Si est considéré comme un déchet des industries de fabrication des semi-conducteurs. Dans ce cas, toutes les consommations et émissions liées aux étapes de production, de MG-Si au « off grade silicon » devra être négligée.

Les consommations énergétiques et les émissions de CO₂ y associées sont reprises dans le tableau 9, exprimées respectivement en MJ/Wc et en kgC/Wc.

	Option 1		Option 2: SiCl4 est un co-produit		Option 3: "off grade Si" est un déchet	
	Energie [MJ/Wc]	CO2 [kgC/Wc]	Energie [MJ/Wc]	CO2 [kgC/Wc]	Energie [MJ/Wc]	CO2 [kgC/Wc]
production MG-Si	11,16	0,27	2,52	0,07		
production poly-Si	13,44	0,47	3,00	0,10		
production c-Si	24,00	1,57	24,00	1,00		
Sous-total	48,60	1,57	29,52	1,00	0,00	0,00
production tranches			12,48		12,48	0,43
fabrication des cellules			1,08		1,08	0,00
Ss-total production cellules			13,56		13,56	0,44
fabrication des modules			1,56		1,56	0,00
structure de support			0,36		0,36	0,02
onduleur			0,60		0,60	0,03
Total	64,68	2,06	45,60	1,49	16,08	0,49

Tableau 9 : Consommations énergétiques et émissions associées à la production des modules PV.

En supposant une production de 3470 kWh par an, on obtient un temps de retour énergétique variant de 4 ans pour l'option 3 à 15 ans pour l'option 1. Il faut préciser que l'option 3 n'a de sens que dans une optique de planification intégrée d'une entreprise de fabrication des semi-conducteurs.

Si nous tenons compte d'une durée de vie de 20ans pour les équipements, il vient une émission de carbone de 21 g par kWh d'électricité produite pour l'option 3 et respectivement 64 et 89 pour les options 2 et 1.

Le rendement du système ici est 0,81. Pour une centrale équivalente mais construite avec des modules en Silicium polycristallin, l'émission de Carbone sont d'environ 16 gC/kWh⁹ et de 7 gC/kWh⁹ si les modules sont fabriqués avec le silicium amorphe (Kato et al., 1997)⁹.

Une étude japonaise(Komiyama et al, 1996)¹⁰ donne les valeurs de 27,6gC/kWh⁹ pour la construction des modules pour une centrale de 10 MW et 59gC/kWh⁹ si l'on tient compte de la construction de la centrale.

Depuis une dizaine d'années, plusieurs études ont été réalisées dans le but de calculer la consommation énergétique de la fabrication des modules ou systèmes PV.

⁹ Kato K. et al; 1997; An evaluation of the life cycle of photovoltaic energy system considering production energy of off-grade silicon; Solar Energy Materials and Solar Cells N° 47, pp 95 – 100.

¹⁰ Komiyama H. et al. ; 1996; Life cycle analysis of solar cell systems as a means to reduce atmospheric carbon dioxide emissions; Energy Convers. Mgmt Vol 37, Nos 6-8, pp. 1247 – 1252.

5 La filière Biométhanisation

La digestion anaérobie des déchets organiques et des effluents industriels est un processus biologique de décomposition de la matière organique présente qui se déroule en absence d'oxygène et qui conduit à la formation de biogaz, mélange de méthane CH₄ (50 à 75%) et de gaz carbonique CO₂ (25 à 50%).

Deux types de bactéries sont responsables de cette décomposition biologique selon que le processus soit à température moyenne ou élevée :

- bactéries mésophiles : température moyenne 30 à 40°C,
- bactéries thermophiles : température élevée 50 à 60°C.

La matière organique, qu'elle soit d'origine naturelle ou industrielle, est composée d'un squelette de carbone sur lequel se sont fixées d'autres éléments en proportions variables : essentiellement hydrogène et oxygène (sucres et graisses), azote (protéines), phosphore (acides nucléiques) ou soufre (certains acides aminés). Une molécule riche en hydrogène (graisses) a un potentiel énergétique plus élevé qu'une molécule contenant moins d'hydrogène (sucres).

Le processus de digestion anaérobie est représenté à la figure 7.

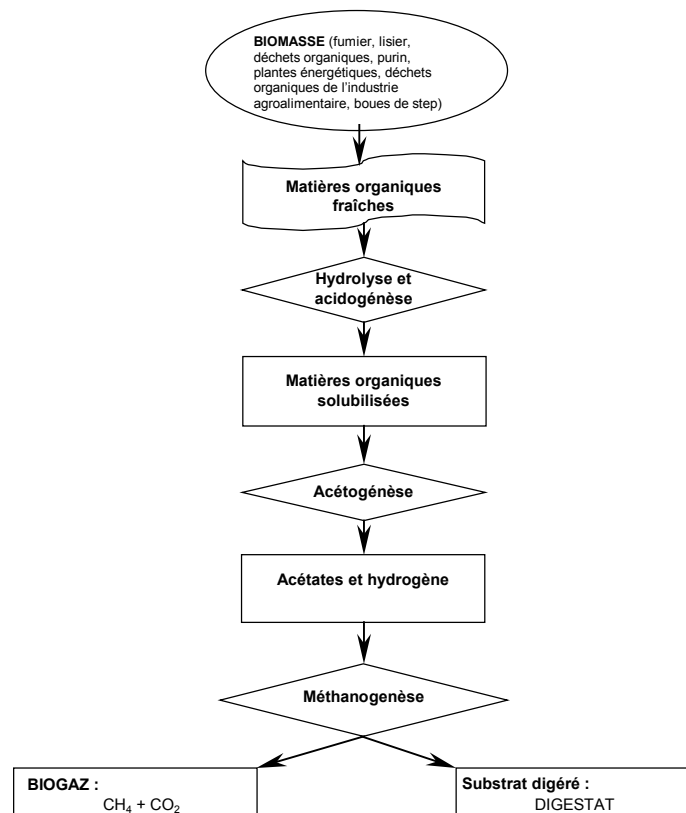


Fig.7 : Schéma de la digestion anaérobie des matières organiques

Pour analyser toute la filière de production des déchets par biométhanisation, on doit encore tenir compte,

en amont :

- Transport des déchets: évaluation des consommations par unité d'intrants par an

en aval:

- Valorisation du compost comme substitution aux engrais minéraux

Économie d'énergie: 360 MJ/tonne de compost

- Production d'énergie (électricité ou chaleur)

Le tableau 10 présente l'inventaire des matériaux utilisés pour la construction des différents composants de production d'énergie à partir du biogaz, prenant en compte la production de biogaz et le stockage du substrat post digestion. Les données sur les besoins en superficie et en matériaux de construction proviennent de 2 constructeurs suisses, de même pour le hall d'entreposage. Les valeurs sont indiquées par m³ de digesteur et par an et proviennent d'une installation de 300 m³.

La durée de vie des différents composants sont supposés comme suit: 20 ans pour les digesteurs, 15 ans pour les machines et le cogénérateur, 5 ans pour le gazomètre en plein air et 10 pour le gazomètre sous toit.

On tient aussi compte du démantèlement, principalement du recyclage des métaux. On suppose que le béton y compris le fer qui a servi à son armement est mis dans une décharge de matières inertes.

	Unités	Cuve en béton	Cuve en acier	Hall de stockage des substrats post digestion
Construction				
Surface	m ²	0,36	0,367	1,1
Béton (sans fer)	kg	28,8	11,2	80
Acier (sans alliage)	kg	1,08	1,3	2,72
Acier (très allié)	kg	0,13	0,24	0,04
Bois	kg	0,66		
Cuivre	kg	0,025	0,017	
Polystyrol	kg	0,057		
PE	kg	0,017	0,133	
PVC "schlagfest"	kg	0,033		
Acier (légèrement allié)	kg		0,341	0,017
Caoutchouc EPDM	kg		0,167	
Laine minérale	kg	0,12	0,105	
Mortier	kg		0,2	
Polyesterharz gesätigt	kg		0,133	
Transport				
par camion 28 tonnes	tkm	0,77	0,42	1,87
par rail	tkm	0,15	0,33	0,03
Traitement des déchets				
béton armé	kg	29,88	12,5	82,72
bois non traité	kg	0,66		
polystyrol	kg	0,06		
PVC	kg	0,03		
plastique	kg	0,14	0,43	
Laine minérale	kg		0,11	
Unité de conversion énergétique				
Construction cogénérateur 160 kW	pièce	0,00022	0,00022	
Electrotechnique cogénérateur 160 kW	pièce	0,00022	0,00022	
Moteur à gaz 206 kW	pièce	0,00022	0,00022	
Générateur 200 kW	pièce	0,00022	0,00022	
Chauffage/sanitaire cogénérateur 160 kW	pièce	0,00022	0,00022	
Mise en service cogénérateur 160 kW	pièce	0,00022	0,00022	
Montage du module cogénérateur 160 kW	pièce	0,00022	0,00022	
Conception cogénérateur 160 kW	pièce	0,00022	0,00022	
Armoire électrique cogénérateur 160 kW	pièce	0,00022	0,00022	
Insonorisation cogénérateur 160 kW	pièce	0,00022	0,00022	
Réservoir 10000 litres	pièce	0,00022	0,00022	
Echangeur de chaleur cogénérateur 160 kW	pièce	0,00022	0,00022	
Ventilation cogénérateur 160 kW	pièce	0,00022	0,00022	
Assemblage générateur-moteur	pièce	0,00022	0,00022	

Tableau 10 : Bilan matière d'une installation de biodigestion.

Le tableau 11 résume le bilan énergétique de la phase d'exploitation.

Bilan énergétique et environnemental de la phase d'exploitation

Exploitation par m3 digesteur par an	unités	Purin de vache	Purin de porc	Purin de vache + Cosubstrat	Purin de porc + Cosubstrat	Vache +porc	Vache +porc+ Cosubstrat
Diesel dans les machines	TJ	0	0	0,0001	0,0001	0	0,0001
Biogaz produit par an	m3	208,1	225,9	337	354,9	0	0
Biogaz produit par an	kg	233	252,9	377,3	397,4	0	0
Biogaz produit par an	MWh	1,39	1,51	2,25	2,37	0	0
Consommation Chaleur digesteur	MWh	0,0022	0,0025	0,0016	0,0019	0	0
Surplus de chaleur	MWh	0,307	0,2635	0,7648	0,6748	0	0
Production d'électricité	MWh	0,4295	0,4665	0,6958	0,78	0	0
Consommation d'électricité	MWh	0,0333	0,0333	0,05	0,05	0	0
Électricité prélevée du réseau	MWh	0,01332	0,01332	0,02	0,02	0,0167	0,0267
Électricité fournie au réseau	TJ	0,0015	0,0016	0,0024	0,0027	0	0

Tableau 11 : Bilan énergétique d'une installation de 300 m³ en phase d'exploitation

Conclusions et perspectives

L'évaluation des bilans énergétique et environnementaux est basée sur une méthodologie claire, quoique certaines valeurs de référence restent à affiner.

Les cas étudiés permettent à ce stade de l'étude de conclure que le solaire PV présente un avantage sur le plan environnemental même en le comparant aux centrales TGV mais est pénalisé par les temps de retour énergétique très longs. Les technologies émergentes comme celles utilisant le silicium polycristallin ou amorphe sont meilleurs. On peut affirmer qu'une structure intégrée combinée à la fabrication des semi-conducteurs reste très avantageuse.

Nous avons pu confirmer les avantages aussi bien environnemental qu'énergétique des centrales éoliennes, avec des émissions de carbone inférieures à 1g par kWh d'électricité produite.

En ce qui concerne la biométhanisation, l'étude de la valorisation des déchets d'élevage a été amorcée. Les filières de déchets ménagers et industriels restent à étudier. Des précisions sur les émissions doivent être faites et des utilisations alternatives.

Pour toutes les filières, il faudra uniformiser les valeurs spécifiques d'énergie et émissions pour les matériaux.