



*Projet Atelier pour le climat 2012/2013*

*Stocker le Soleil!?*



# Stocker le soleil !?

## Sommaire

---

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>ECOLOGIE.....</b>	<b>5</b>
2.1	SITUATION ACTUELLE.....	5
2.2	SITUATION FUTURE AVEC APPLICATION DE NOTRE PROJET .....	5
<b>3</b>	<b>PRESENTATION DU SYSTEME .....</b>	<b>6</b>
3.1	FILM PHOTOVOLTAÏQUE ORGANIQUE .....	6
3.1.1	<i>But</i> .....	6
3.1.2	<i>Le principe</i> .....	6
3.1.3	<i>La technique</i> .....	6
3.1.4	<i>La production</i> .....	7
3.1.5	<i>Les avantages</i> .....	7
3.1.6	<i>Les désavantages</i> .....	7
3.2	L'ELECTROLYSEUR .....	7
3.2.1	<i>But</i> .....	7
3.2.2	<i>La technique</i> .....	7
3.3	STOCKAGE ENERGETIQUE SOUS FORME GAZEUSE.....	8
3.3.1	<i>But</i> .....	8
3.3.2	<i>La technique</i> .....	8
3.3.3	<i>Les avantages</i> .....	8
3.3.4	<i>Les inconvénients</i> .....	8
3.4	PILE A COMBUSTIBLE .....	8
3.4.1	<i>But</i> .....	8
3.4.2	<i>Les composants</i> .....	8
3.4.3	<i>La technique</i> .....	9
3.5	SYSTEME DE CHAUFFAGE .....	9
3.5.1	<i>But</i> .....	9
3.5.2	<i>La technique</i> .....	9
3.6	SYSTEME GENERAL.....	10
3.6.1	<i>But</i> .....	10
3.6.2	<i>Principe</i> .....	10
3.6.3	<i>Schéma</i> .....	10
3.6.4	<i>Les avantages</i> .....	11
3.6.5	<i>Les inconvénients</i> .....	11
<b>4</b>	<b>CALCULS .....</b>	<b>11</b>
4.1	2.1 .....	11
4.2	3.1.5.....	11
4.3	3.3.2.....	12
4.4	3.6.4.....	13
<b>5</b>	<b>REALISABILITE DU PROJET / CONCLUSION .....</b>	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>DEROULEMENT DE LA REDACTION.....</b>	<b>15</b>
<b>7</b>	<b>SOURCES.....</b>	<b>16</b>
7.1	SITES INTERNET.....	16
7.2	DOCUMENTATION ECRITE .....	16
7.3	AUTRES .....	16
<b>8</b>	<b>ANNEXES .....</b>	<b>17</b>
8.1	PILE A COMBUSTIBLE .....	17
8.2	SYSTEME GENERAL NOIR ET BLANC.....	18



Equipe:

Jérémy Kottelat	Raphaël Pelletier
	

Métier: Apprenti laborantin en chimie

Année: 2<sup>ème</sup>

Ecole: CEJEF Division Technique, Porrentruy



Enseignante: Mme Virginie Plumez



## 1 Introduction

**D**ans un premier temps, nous sommes partis sur le sujet des piles à combustible. En faisant des recherches sur ces dernières et l'énergie, nous sommes tombés sur un article parlant de films photovoltaïques. Trouvant cet article intéressant, nous avons décidé d'assembler les deux idées.

Ce mélange de technologies permettrait à un bâtiment résidentiel, à un quartier, voir même à un complexe industriel, d'être autonome en alimentation électrique à partir d'une source "verte" et à un prix abordable.

De plus, la production d'énergie serait continue de jour... comme de nuit!

Bien entendu, notre projet est entièrement théorique pour des raisons de budget, mais sa réalisation par une entreprise innovante serait un bon investissement pour une éventuelle mise sur le marché.

Nous donnerons dans notre projet beaucoup de chiffres financiers car le facteur déterminant avec les mentalités actuelles pour un investissement dans les nouvelles technologies est principalement l'attrait pour l'argent. Nous savons que ce n'est pas un facteur écologique, mais il est le seul à mener à de grands changements.

Plus l'économie est importante, plus l'attrait est grand, plus les quantités de ventes seront élevées et plus les répercussions bénéfiques sur le climat seront grandes.



## 2 Ecologie

### 2.1 Situation actuelle

Nous savons qu'un ménage suisse moyen consomme annuellement 4'000 kWh d'électricité, soit environ 1000.- CHF (prix moyen de 25 cts/kWh). Il consomme également 2500 litres de mazout de chauffage, soit, au cours actuel (100.- CHF/100 litres), 2500.- CHF. Sans oublier que le prix du mazout est en constante augmentation. Un ménage suisse moyen a donc des coûts énergétiques pour un total de 3500.- CHF par an.

Ce raisonnement est évidemment applicable pour toute industrie.

En plus d'un coût relativement haut, le bilan écologique de ce mode de consommation est lourd. Des quantités faramineuses de CO<sub>2</sub> sont rejetées dans l'environnement, environ 2,6 kg/l de mazout toujours pour un système de chauffage, soit environ 6,5 tonnes de CO<sub>2</sub> par an (env. 3,3 millions de litres). D'autres gaz encore plus nocifs sont aussi émis dans l'atmosphère pendant la combustion du mazout, tels que les oxydes d'azotes (NO<sub>x</sub>), le monoxyde de carbone (CO), mais encore des sulfures, de l'ozone et d'autres gaz à effet de serre.

Pour un système de chauffage électrique conventionnel, les rejets en CO<sub>2</sub> sont plus bas, mais des déchets radioactifs sont produits (env. 346 g par personne et par an).

A vous de choisir !

### 2.2 Situation future avec application de notre projet

L'application de notre projet permettrait à un ménage ou à une entreprise d'être autonome en électricité et en chauffage tout en utilisant une énergie verte et théoriquement illimitée, l'énergie solaire.

Outre les coûts d'installation et d'entretien, aucune dépense n'est induite par la production d'énergie. La rentabilité à long terme est donc assurée.

Du côté des gaz à effet de serre, le bilan est neutre pour la production d'énergie et seul la construction émet du CO<sub>2</sub>. Pour un ordre d'idée, environ 1000 fois moins qu'une installation classique au mazout.

De très petits rejets sont à déplorer lors de la construction, mais ils sont insignifiants comparé à une installation à mazout. De plus, une grande partie de l'installation est recyclable.



### 3 Présentation du système

#### 3.1 Film photovoltaïque organique

##### 3.1.1 But

Produire de l'électricité de façon écologique.

##### 3.1.2 Le principe

Imaginez une maison, un immeuble, une usine... dont les murs et les toits seraient recouverts d'un film photovoltaïque souple et pratiquement transparent. Ces bâtiments deviendraient de vraies centrales électriques !

Les films solaires existent depuis plusieurs années et leur rendement ne cesse d'augmenter pour dépasser les 10% de rendement à l'heure actuelle. Dans le commerce on en trouve déjà à 8%.

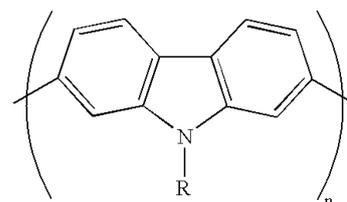
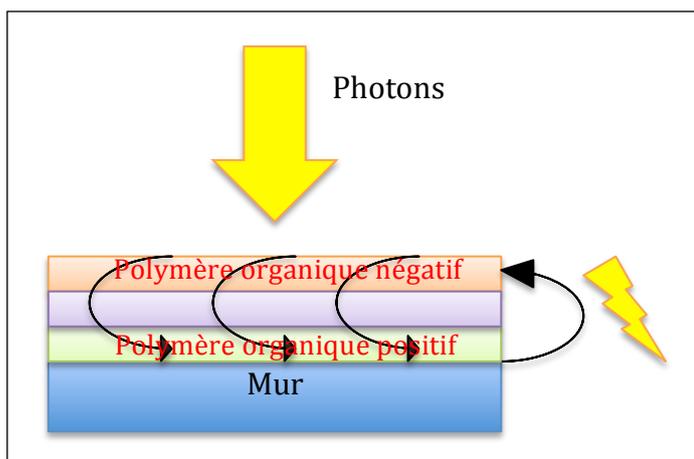
##### 3.1.3 La technique

L'énergie solaire (les photons) frappe la surface du polymère organique partiellement chargé. Les électrons sont arrachés à ce matériau chargé négativement par les photons.

Ils migrent ensuite vers l'autre pôle électrique (le matériau chargé positivement) par une membrane moins conductrice que le câble de retour, mais suffisamment pour laisser passer les électrons.

Une fois dans le polymère chargé positivement, les électrons ont tendance à retourner du côté négatif. Ils passent donc au plus simple par le câble (bon conducteur). Et ainsi de suite ... Un flux électrique est créé. Le principe est semblable au fonctionnement d'un panneau photovoltaïque conventionnel. Seuls les matériaux utilisés sont innovants, mais c'est là que se joue toute la différence, ils deviennent beaucoup plus attrayants puisqu'on ne les voit plus.

Les polymères utilisés sont en général des polycarbazols. Les polycarbazols sont sensibles à l'infrarouge et permettent donc une production même par temps couvert (ils traversent les nuages).





### 3.1.4 La production

La technique de production la plus simple consiste à imprimer directement les films comme on le ferait pour un journal. L'encre est remplacée par les polymères voulus. L'impression se déroule en continu sur un plastique transparent. La face supérieure du film est recouverte par un revêtement protégeant de la dégradation par les UV.

### 3.1.5 Les avantages

Aucun composant nocif n'est à signaler. De plus, les films sont hautement recyclables. Par ailleurs, ils sont transparents et flexibles.

Les coûts de production sont faibles. Pour indication, le film photovoltaïque coûterait environ 100.- CHF / m<sup>2</sup>. Comparé au coût de panneaux photovoltaïques conventionnels, on constate une économie de 80% (en tenant compte du rendement des panneaux, voir calculs).

### 3.1.6 Les désavantages

Leur durée de vie est moindre (15 ans) et leur rendement est relativement bas (10% contre 25% pour un panneau photovoltaïque monocristallin de moyenne gamme).

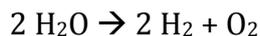
## 3.2 L'électrolyseur

### 3.2.1 But

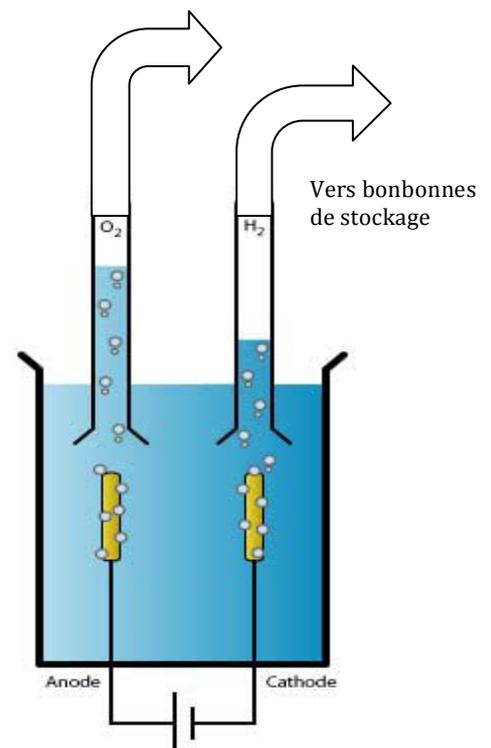
Transformer l'électricité produite par les films photovoltaïques en hydrogène afin d'éviter l'utilisation de batteries.

### 3.2.2 La technique

Le principe de l'électrolyseur est relativement simple. Le courant électrique produit par les films photovoltaïques dissocie l'eau (H<sub>2</sub>O), en dihydrogène (H<sub>2</sub>) et en dioxygène (O<sub>2</sub>).



Si l'on regarde l'équation, on voit qu'il se forme deux fois plus d'hydrogène que d'oxygène. Il est toutefois nécessaire de mettre un peu d'un sel quelconque (ex. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) pour que le courant puisse traverser l'eau de l'électrolyseur (l'eau pure ne conduit pas l'électricité).





Il suffit pour notre installation, d'un récipient avec une anode et une cathode et d'un système de récupération des gaz qui vont être stockés puis utilisés dans la pile à combustible.

### 3.3 Stockage énergétique sous forme gazeuse

#### 3.3.1 But

Stocker l'hydrogène produit par l'électrolyseur.

#### 3.3.2 La technique

L'hydrogène produit par l'électrolyseur est comprimé grâce à un compresseur et stocké sous haute pression (environ 200 bars) dans des bonbonnes.

1 bonbonne de 50 litres est nécessaire au stockage des 660g d'hydrogène consommés journalièrement par un ménage moyen (voir calculs).

Pour une sécurité énergétique par très mauvais temps, 4 bonbonnes seraient conseillées (toujours pour un ménage moyen).

Pour une entreprise ou un complexe industriel, les quantités de gaz à stocker et les installations de stockage seraient nettement plus imposantes.

#### 3.3.3 Les avantages

Aucune batterie n'est nécessaire. Les métaux lourds des batteries ordinaires, par exemple le plomb, sont ainsi éliminés.

Le stockage de l'hydrogène prend peu de place comparativement aux citernes à mazout.

#### 3.3.4 Les inconvénients

Danger d'explosion dans des cas critiques de mauvaise utilisation.

### 3.4 Pile à combustible

#### 3.4.1 But

Reconvertir l'hydrogène stocké quelques heures auparavant en électricité.

#### 3.4.2 Les composants

Dans les grandes lignes, la pile à combustible est un système composé d'une membrane protonique (qui ne laisse passer que les protons), d'une arrivée d'hydrogène, d'une arrivée d'oxygène, d'une sortie pour l'eau formée par les réactions et d'un câble pour permettre le passage des électrons.

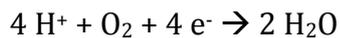
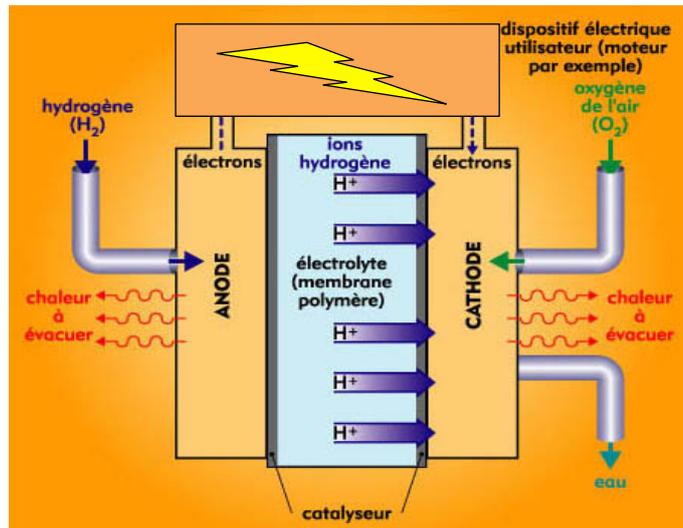


### 3.4.3 La technique

Une molécule d'hydrogène ( $H_2$ ) arrive dans la pile à combustible et se dissocie. C'est à dire que les noyaux d'hydrogènes (les cations  $H^+$ ) se séparent des électrons ( $e^-$ ).



Ensuite, les noyaux passent par la membrane protonique (l'électrolyte), et les électrons passent par le câble électrique pour produire du courant (le courant électrique est un flux d'électrons). De l'autre côté de la membrane, une fois qu'ils ont traversé, les ions hydrogène se combinent avec l'oxygène de l'air (injecté à la cathode) et les électrons venant du câble pour former de l'eau (voir autre schéma dans les annexes).



L'eau et les déchets de l'air sont évacués. L'eau peut être utilisée pour alimenter l'électrolyseur.

Ce système produit également un peu de chaleur que l'on peut difficilement récupérer.

## 3.5 Système de chauffage

### 3.5.1 But

Produire de l'énergie calorifique avec l'électricité produite par les films photovoltaïques ou la pile à combustible.

### 3.5.2 La technique

Un chauffage électrique conventionnel est couplé à la pile à combustible. Il peut sans problème être raccordé à des radiateurs ou à un réseau du chauffage au sol déjà existants.

L'eau sanitaire peut aussi être chauffée de cette façon.



### 3.6 Système général

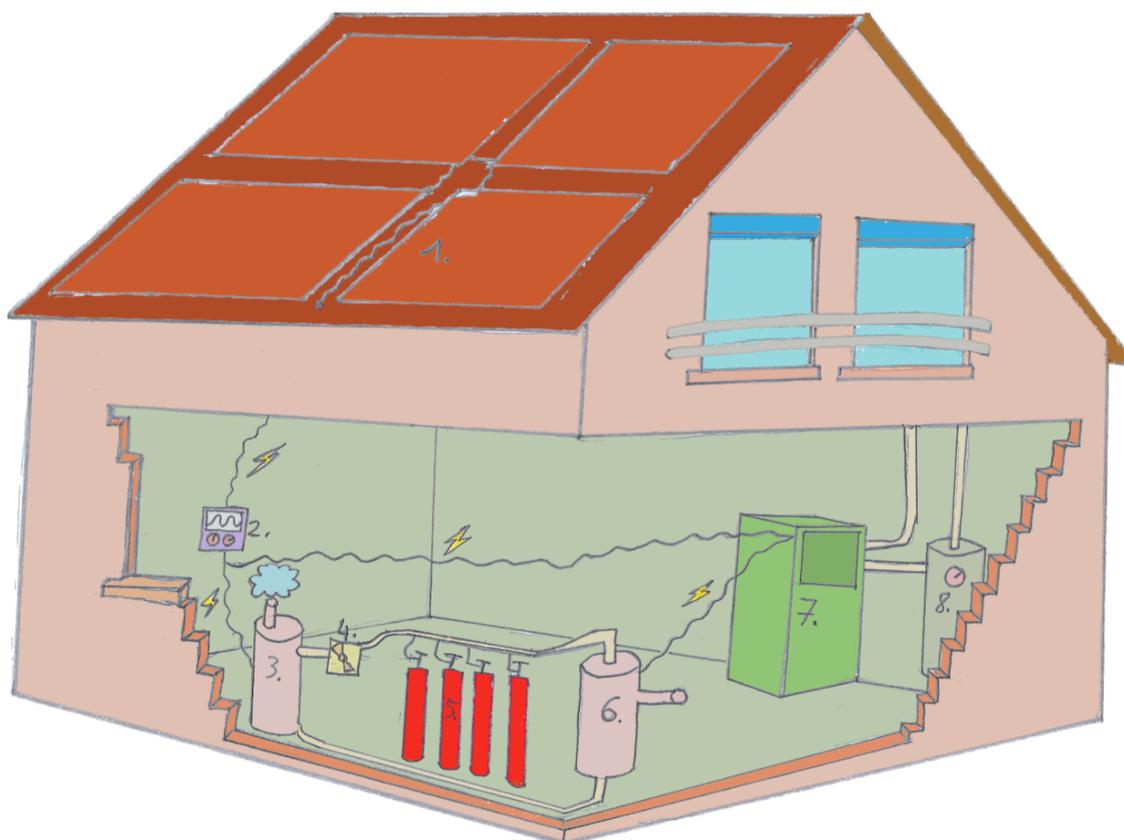
#### 3.6.1 But

Alimenter en électricité un bâtiment pour couvrir tous ses besoins en électricité (chauffage et consommation ménagère).

#### 3.6.2 Principe

Les films photovoltaïques organiques convertissent le rayonnement solaire en énergie électrique. Une partie de cette électricité est utilisée directement. Le surplus est stocké sous forme d'hydrogène grâce au système de stockage (électrolyseur, compresseur et bonbonnes) et est redistribué sur le réseau ménager grâce à la pile à combustible lorsque les panneaux solaires ne produisent pas ou pas assez d'électricité. Par exemple, on peut citer la nuit et les pics de consommation (midi, soirée, grands froids,...).

#### 3.6.3 Schéma



- |                                |                                    |
|--------------------------------|------------------------------------|
| 1. Film solaire photovoltaïque | 5. Bonbonnes d'hydrogène           |
| 2. Transformateur DC/AC        | 6. Pile à combustible              |
| 3. Electrolyseur               | 7. Système de chauffage électrique |
| 4. Compresseur                 | 8. Boiler                          |



### 3.6.4 Les avantages

- ✓ Production d'énergie "verte"
- ✓ Système hautement recyclable
- ✓ Adaptable à tout type de bâtiment
- ✓ Pas plus d'entretien que pour les différents systèmes
- ✓ Autonomie
- ✓ Indépendance face à l'inflation des coûts de l'électricité et du pétrole
- ✓ Coûts comparables voir inférieurs aux autres systèmes de chauffage ou de production d'énergie (voir calculs)

### 3.6.5 Les inconvénients

- ⚠ Prend un peu plus de place que d'autres systèmes
- ⚠ Risques plus élevés avec les tuyaux haute pression et les bonbonnes d'hydrogène sous pression (jusqu'à 200 bars)
- ⚠ Surface de film solaire conséquente (env. 150 m<sup>2</sup>)
- ⚠ Durée de vie un peu moins longue que les autres systèmes

## 4 Calculs

### 4.1 2.1

2500 litres x 2.6 kg de CO<sub>2</sub> émis/litre de mazout = 6500 kg de CO<sub>2</sub> = 6.5 tonnes

### 4.2 3.1.5

Prix du m<sup>2</sup> de panneau photovoltaïque : 1500.- CHF (moyenne suisse)  
Prix du m<sup>2</sup> de film photovoltaïque : 100.- CHF (prix théorique \*)  
Rendement de panneau photovoltaïque : 30% (pour les meilleurs et plus chers!)  
Rendement de films photovoltaïque : 10%

$(100:1500) \times (30:10) = 20\%$  du prix → 80% d'économie par rapport à des panneaux photovoltaïques classiques.

\*Ces films photovoltaïques ne sont pas encore commercialisés pour le grand public. Les prix ne sont que des estimations sans tenir compte des marges que peuvent se faire les producteurs et les revendeurs.

**4.3 3.3.2**

Consommation annuelle: 4000 kWh  
 Consommation journalière: ~ 11 kWh (= 4000/365)

Réaction globale:  
 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$

432.2 kJ/mole sont consommées pour la dissociation d'H<sub>2</sub>  
 Soit;  $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H} \quad \Delta E = 432.2 \text{ kJ/mol}$   
 Et 494.1 kJ/mole pour la dissociation d'O<sub>2</sub>  
 Soit;  $\text{O}_2 \rightarrow 2\text{O} \quad \Delta E = 494.1 \text{ kJ/mol}$   
 La formation des liaisons O-H de l'eau libre 460,4 kJ/mole  
 Soit;  $\text{H} + \text{O} \rightarrow \text{HO} \quad \Delta E = -460.4 \text{ kJ/mol}$

Bilan de la réaction globale:

$$432.2 + \frac{1}{2} \cdot 494.1 - 2 \cdot 460.4 = -241.55 \text{ kJ/mol}$$

$$\text{Soit; } 2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} \quad \Leftrightarrow \quad \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} \quad \Delta E = -241.55 \text{ kJ/mol}$$

Donc, pour une mole d'H<sub>2</sub> consommée, 241.55 kJ sont produites

$$1\text{kWh} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ Joules (J)}$$

$$11\text{kWh} = 3.96 \cdot 10^7 \text{ J}$$

$$241.55 \cdot 10^3 \text{ J} = 1\text{mol H}_2$$

$$3.96 \cdot 10^7 \text{ J} = 163.94\text{mol}$$

$$1\text{mole d'H}_2 = 2.016\text{g}$$

$$163.94 \text{ moles d'H}_2 \approx 330\text{g}$$

Ces 330g sont obtenus avec un rendement de 100%. En réalité, les meilleures piles à combustible ont un rendement de 94% et les moins bonnes de 45%. Nous prendrons 50% pour simplifier nos calculs.

La consommation journalière pour un ménage suisse moyen serait donc de 660g d'H<sub>2</sub> par jour.

Prenons des bonbonnes de 50l sous 200bar;

$$1 \text{ mole d'H}_2 = 22.4\text{litres}$$

$$163.94 \text{ moles}/50\% = 7344.512\text{l}$$

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} \Rightarrow \frac{1.013\text{bar} \cdot 7344.512\text{l}}{273.15 \text{ K}} = \frac{201.013\text{bar} \cdot xl}{293.15\text{K}}$$

$$xl = \frac{1.013 \cdot 7344.512 \cdot 293.15}{273.15 \cdot 201.013} = 39.72\text{l}$$

Une bonbonne (50l) suffirait donc à la consommation journalière.

Pour être en sécurité énergétique totale, nous conseillerions (en étant très large) 4 bonbonnes.



4.4 3.6.4

Coût du système:

Description	Quantité	Unité	Prix unitaire	Prix total
Film photovoltaïque organique	150	m2	CHF 100	CHF 15'000
Convertisseur DC/AC	1	-	CHF 80	CHF 80
Electrolyseur	1	-	CHF 5'000	CHF 5'000
Compresseur haute pression	1	-	CHF 20'000	CHF 20'000
Bonbonne de stockage hydrogène	4	-	CHF 3'750	CHF 15'000
Détendeur	1	-	CHF 800	CHF 800
Pile à combustible	1	-	CHF 25'000	CHF 25'000
Boiler et système de chauffage	1	-	CHF 5'000	CHF 10'000
Tuyauterie	-	-	-	CHF 5'000
Marge d'erreur	-	-	-	CHF 4'120
<b>Prix total de l'installation</b>				<b>CHF 100'000</b>

Coût d'entretien et d'alimentation:

Environ 750.- CHF /an

Note: Les chiffres ont été un peu exagérés.

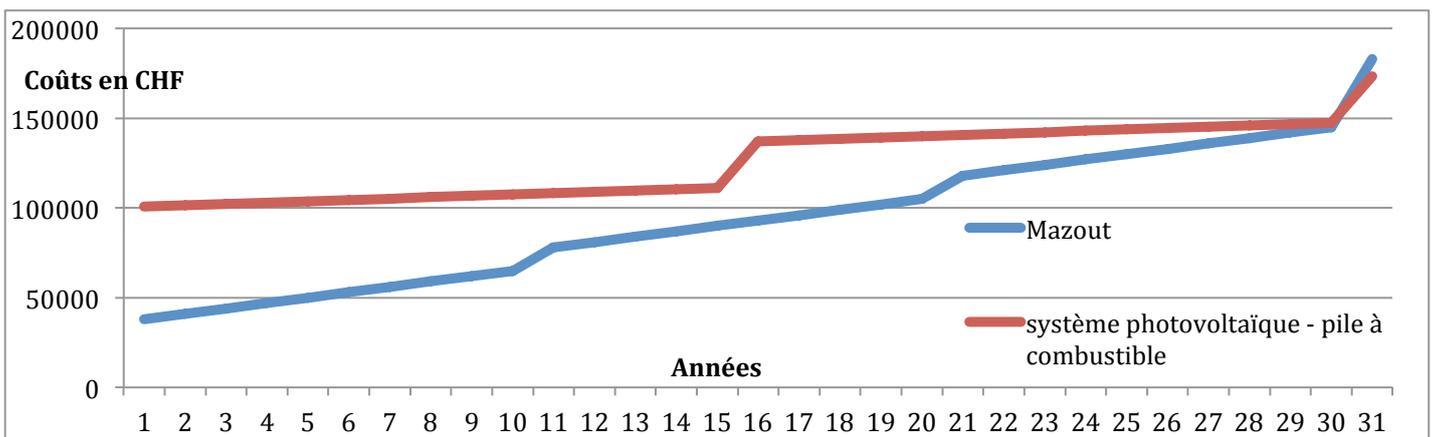
Coût d'un chauffage à mazout:

Environ 35'000.- CHF

Coût d'entretien et d'alimentation:

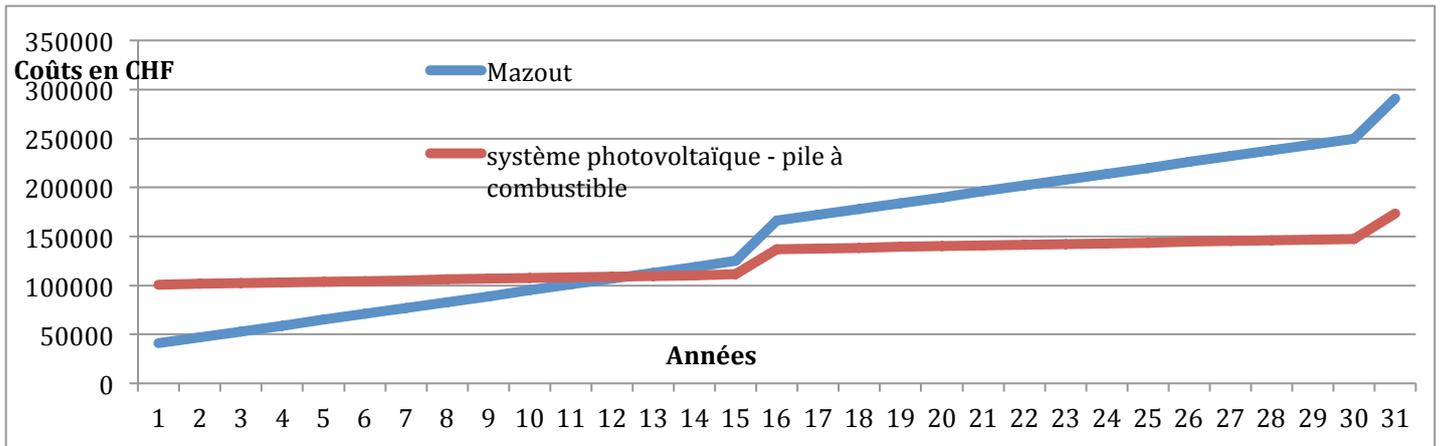
3'000.- CHF /an

Comparaison:





Estimation en doublant le prix du pétrole:



Les bonds dans les deux courbes correspondent à des révisions générales ou carrément des changements de matériel.

La rentabilité se joue sur le long terme.

Nos calculs ne tiennent pas compte d'une éventuelle prime écologique et restent des estimations.

Le graphique réel se situerait probablement entre nos deux estimations avec l'évolution actuelle.



## 5 Réalisabilité du projet / Conclusion

Les données écologiques et économiques nous ont grandement fait défaut pour réaliser ce travail, étant donné qu'une majorité des modules sont encore en phase de développement.

Tous les éléments essentiels à la mise en place de notre projet sont techniquement fonctionnels de manière individuelle. Seul l'assemblage de ces composants reste à mettre en place.

Si nous gagnons le concours atelier pour le climat et que notre projet s'avère enthousiasmant (d'un autre point de vue que le nôtre), nous envisageons de nous adresser aux entreprises des domaines concernés, en vue de le développer et de le mettre en application le plus rapidement possible.

## 6 Déroulement de la rédaction

Événement	Date
<b>Début du projet</b>	Lundi 01 octobre 2012
<b>Choix du sujet</b>	
<b>Création d'un plan principal avec les points à traiter</b>	Lundi 22 octobre 2012
<b>Développement de l'introduction</b>	Lundi 29 octobre 2012
<b>Développement de la partie écologique</b>	Lundi 5 novembre 2012
<b>Développement des points techniques</b>	Lundi 26 novembre 2012
<b>Suite</b>	Lundi 5 décembre 2012
<b>Suite</b>	Lundi 10 décembre 2012
<b>Suite</b>	Lundi 17 décembre 2012
<b>Conclusion,...</b>	Jeudi 3 janvier 2013
<b>Finalisation</b>	



## **7 Sources**

### **7.1 Sites internet**

<http://www.energie-environnement.ch>

<http://www.econologie.com/emissions-de-co2-par-litre-de-carburant-essence-diesel-ou-gpl-articles-3723.html>

<http://www.photovoltaique-transparent.com/>

<http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectrolyse>

<http://uuu.enseirb.fr/~dondon/devdurable/TPpilecombustible/TPpileacombustible.htm>

[http://fr.123rf.com/islogin\\_globalv8.3.php?cre=y&imageid=10407406&utm\\_source=details&utm\\_medium=web&utm\\_campaign=igv83-cred](http://fr.123rf.com/islogin_globalv8.3.php?cre=y&imageid=10407406&utm_source=details&utm_medium=web&utm_campaign=igv83-cred)

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Fioul>

<http://tpe2009esperance.e-monsite.com/pages/ii-bilan-environnemental.html>

<http://www.freepatentsonline.com/6630254.html>

<http://inoenergies.monipag.com/tag/pile-a-combustible/>

<http://panneausolaire.free.fr/installations.php>

<http://www.cpp.ch/>

[http://www.watteo.fr/product\\_info-n-Pile\\_hydrog\\_ne\\_1000W\\_pour\\_applications\\_marines\\_mobilites\\_et\\_sites\\_isol\\_s-pId-3155.html](http://www.watteo.fr/product_info-n-Pile_hydrog_ne_1000W_pour_applications_marines_mobilites_et_sites_isol_s-pId-3155.html)

### **7.2 Documentation écrite**

Science & Vie N°1125 Juin 2011 – Article "Après Fukushima... Solaire une alternative au nucléaire ?"

Brochure 1to1 energy - forum 03

Cours laborantin en chimie 1<sup>ère</sup> année - Chimie descriptive – L'Hydrogène; compléments

### **7.3 Autres**

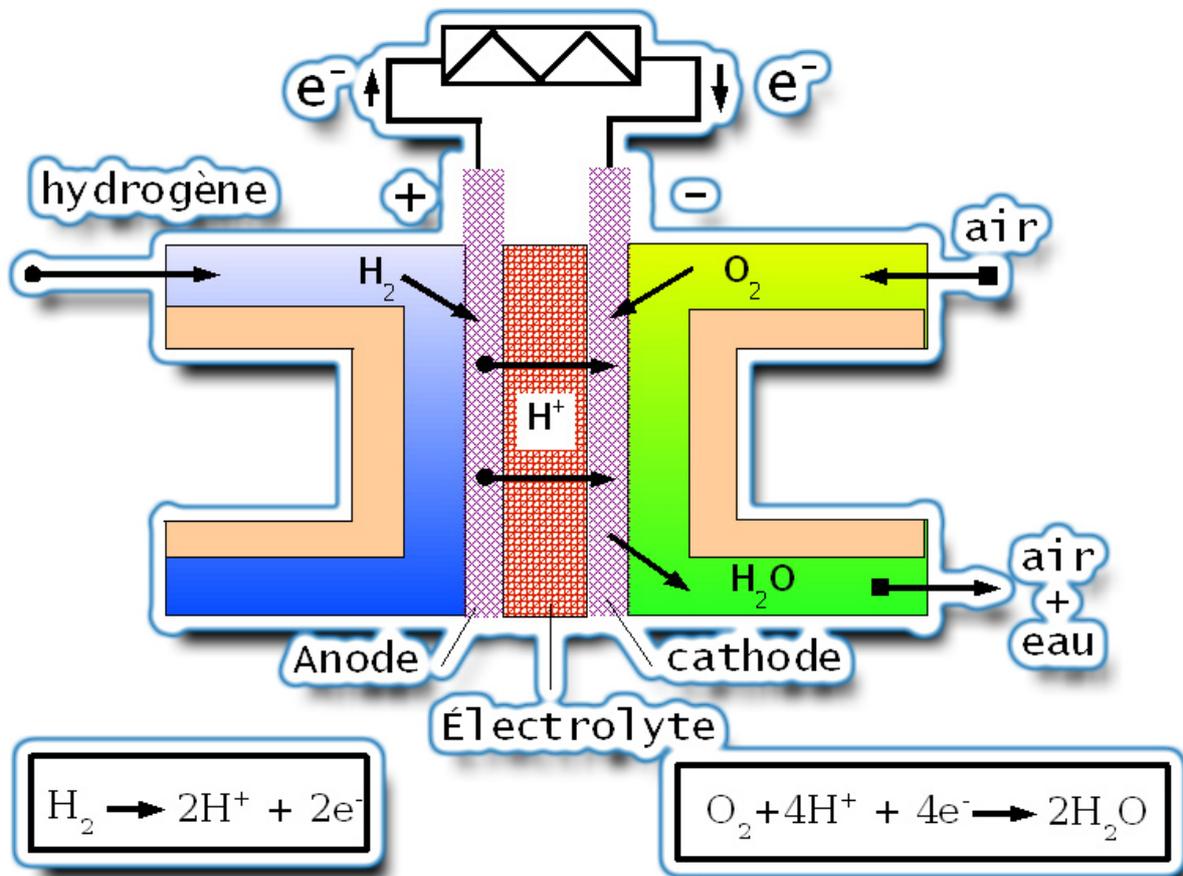
Schéma film solaire photovoltaïque: Raphaël Pelletier & Jérémy Kottelat  
Schéma général: Jérémy Kottelat

La majorité du texte est basée sur nos connaissances générales.  
Nous espérons qu'aucune source n'ait été oubliée.



## 8 Annexes

### 8.1 Pile à combustible





## 8.2 Système général noir et blanc

