UNIVERSITÉ DE GENÈVE

Archive ouverte UNIGE
https://archive-ouverte.unige.ch

Rapport de recherche 1997

Open Access

This version of the publication is provided by the author(s) and made available in accordance with the copyright holder(s).

Etude d'une installation de production d'hydrogène photovoltaïque en Suisse : Maison FRIEDLI à Zollbrück / Untersuchung einer Solarwasserstoff Produktionsanlage in der Schweiz : FRIEDLI-Haus in Zollbrück

Hollmuller, Pierre

How to cite

HOLLMULLER, Pierre. Etude d'une installation de production d'hydrogène photovoltaïque en Suisse : Maison FRIEDLI à Zollbrück / Untersuchung einer Solarwasserstoff Produktionsanlage in der Schweiz : FRIEDLI-Haus in Zollbrück. 1997

This publication URL: https://archive-ouverte.unige.ch/unige:22537

© This document is protected by copyright. Please refer to copyright holder(s) for terms of use.

UNIVERSITE DE GENEVE

Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie

Laboratoire de cristallographie

Etude d'une installation de production d'hydrogène photovoltaïque en Suisse: Maison FRIEDLI à Zollbrück

Rapport final, mai 1997

Untersuchung einer Solarwasserstoff Produktionsanlage in der Schweiz: FRIEDLI-Haus in Zollbrück

Schlussbericht, Mai 1997

Pierre Hollmuller

Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, Université de Genève, 158 route de Florissant, Case Postale, CH - 1231 Conches, tel/fax: (41)22 - 789 13 11 / 347 86 49.

Laboratoire de cristallographie, Université de Genève, 24 Quai Ernest-Ansermet, Case Postale, CH - 1211 Genève 4, tel/fax: (41)22 - 702 62 15 / 781 21 92.

ADRESSE DE L'AUTEUR

Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie
158 route de Florissant
Case Postale
CH - 1231 Conches

tel/fax: (41)22 - 789 13 11 / 347 86 49
e-mail: pierre.hollmuller@cuepe.unige.ch

TABLE DES MATIERES / INHALTSVERZEICHNISS

INTRODUCTION / EINFÜHRUNG 1

Objet / Objekt 1
But / Ziel 1
Moyens / Mittel 1
Structure / Struktur 1

DESCRIPTION DE L'INSTALLATION / BESCHREIBUNG DER ANLAGE 3

Contexte / Hintergrund 3
Enchaînement des sous-systèmes / Aufgliederung der Anlage in ihre Untersysteme 3
Sécurité / Sicherheit 3
Transformations et pertes énergétiques / Energieumwandlung und Verluste 4
Utilisation rationnelle du rayonnement solaire / Rationelle Nutzung der Sonnenstrahlung 4
Délimitation du champs de l'étude / Abgrenzung des untersuchten Teils der Anlage 5

COMPORTEMENT SUR UN JOUR TYPE / BETRIEBSVERHALTEN AN EINEM DURCHSCHNITTSTAG 11

Production / Produktion 11
Purification / Reinigung 11
Stockage intermédiaire / Zwischenspeicherung 12
Stockage final / Speicherung 12

MODELE ENTREE/SORTIE ET PRODUCTION POTENTIELLE / INPUT/OUTPUT-MODELL UND PRODUKTIONSPOTENTIAL 15

Modèle entrée/sortie / Input/Output-Modell 15
Hypothèses implicites / Grundannahmen 17
Bilan potentiel annuel / Jährliches Produktionspotential 17
Stockage saisonnier / Saisonale Speicherung 19
Optimisation de l'installation / Optimierung der Anlage 20

CONCLUSIONS / SCHLUSSFOLGERUNGEN 22

REMERCIEMENTS / DANKSAGUNGEN 24

****

ANNEXE 1: SYSTEME DE MESURES 25

Type de mesures 25
Liste des sondes 25
Précision des sondes 26

ANNEXE 2: ETUDE DES SOUS-SYSTEMES 28

GISEMENT SOLAIRE 28
Données météorologiques 28
Plan capteur et horizon 28
CHAMPS PHOTOVOLTAÏQUE 31
Description du champs 31
Analyse entrée/sortie 31
Caractéristiques courant/tension 32
Mesure d'ensoleillement du transformateur DC/DC 33
Validation du modèle PVSYST 33
Génération du modèle entrée/sortie saisonnier 34
SYSTEME DE REGULATION ET TRANSFORMATEUR DC/DC 36
Description de l'appareil 36
Modes de fonctionnement 36
Efficacité 37

ELECTROLYSEUR 38
Description de l'appareil *38*
Fonctionnement de l'électrolyse *38*
Caractéristique courant/tension *39*
Consignes d'enclenchement/déclenchement *40*
Comportement en température *40*
Efficacité *40*
Consommation en eau *41*
PURIFICATEUR/SECHEUR 43
Bain de rinçage *43*
Condensateur *43*
Sécheur *43*
Evolution dynamique *43*
Efficacité *44*
BALLON DE STOCKAGE INTERMEDIAIRE 45
Description *45*
Evolution dynamique *45*
COMPRESSEUR 46
Description *46*
Efficacité *46*
STOCK D'HYDRURES METALLIQUES 48
Description du stock *48*
Fonctionnement des hydrures *48*
Caractérisation concentration/pression *48*
Energie de stockage/déstockage *49*
Avantages/désavantages *49*
Evolution dynamique *50*
Gestion inefficace du stock *50*

ANNEXE 3: MESURES EN CONTINU 51

Modes de production, gestion du stock *51*
Panne de mesure *51*
Typologie des jours de mesure *51*
Représentation graphique *51*

****

NOTES 57

BIBLIOGRAPHIE 62

CONSTANTES PHYSIQUES, FACTEURS DE CONVERSION ET DÉFINITIONS D'UNITÉ 63

TABLE DES FIGURES / FIGURENVERZEICHNISS

***Figure 1**: Schéma de l'installation avec flux d'énergie et de matière.....6*
***Figure 2:** Photo du champs photovoltaïque.....7*
***Figure 3:** Photo du transformateur DC/DC.....7*
***Figure 4:** Photo de l'électrolyseur vu de face.....8*
***Figure 5:** Photo de l'électrolyseur vu de côté.....8*
***Figure 6:** Photo du purificateur/sécheur.....9*
***Figure 7:** Photo du ballon collecteur.....9*
***Figure 8:** Photo du stock d'hydrures métalliques du minibus.....10*
***Figure 9:** Photo du système de visualisation.....10*
***Figure 10:** Evolution dynamique de l'électrolyseur le 26 juillet.....13*
***Figure 11:** Evolution dynamique du sécheur le 26 juillet 1996.....13*
***Figure 12:** Evolution dynamique du ballon collecteur le 26 juillet 1996.....14*
***Figure 13:** Evolution dynamique du stock d'hydrures le 26 juillet 1996.....14*
***Figure 14:** Modèle entrée/sortie estival.....15*
***Figure 15:** Potentiel de production annuelle de l'installation.....18*
***Figure 16:** Détermination de la capacité de stockage minimale.....19*
***Figure 17**: Fiche récapitulative du gisement solaire.....28*
***Figure 18:** Evolution mensuelle de la météo de Bern-Liebefeld.....28*
***Figure 19:** Situation géographique de l'installation.....29*
***Figure 20:** Projection sphérique de la course du soleil et de l'environnement immédiat de l'installation.....30*
***Figure 21:** Distribution de l'énergie incidente.....30*
***Figure 22**: Fiche récapitulative du champs photovoltaïque.....31*
***Figure 23**: Comportement estival des puissances d'entrée/sortie du champs de capteur photovoltaïque.....33*
***Figure 24**: Caractéristiques courant/tension d'un panneau photovoltaïque.....33*
***Figure 25:** Détail de l'écart entre puissance photovoltaïque nominale et réelle.....33*
***Figure 26:** Comparaison des puissances photovoltaïques mesurées et simulées.....34*
***Figure 27:** Efficacité saisonnière du captage photovoltaïque.....34*
***Figure 28**: Modèle entrée/sortie saisonnier du captage photovoltaïque.....35*
***Figure 29**: Fiche récapitulative du transformateur DC/DC.....37*
***Figure 30:** Efficacité du transformateur DC/DC.....37*
***Figure 31**: Fiche récapitulative de l'électrolyseur.....38*
***Figure 32:** Caractéristique courant/tension de l'électrolyseur.....39*
***Figure 33:** Efficacité moyenne de l'électrolyseur.....41*
***Figure 34:** Evolution dynamique du besoin en eau.....42*
***Figure 35**: Fiche récapitulative du purificateur/sécheur.....44*
***Figure 36:** Montée en température des deux bottes du sécheur.....44*
***Figure 37**: Fiche récapitulative du ballon collecteur.....45*
***Figure 38**: Fiche récapitulative du compresseur.....46*
***Figure 39:** Caractéristiques de trois cycles successifs de compression.....46*
***Figure 40**: Fiche récapitulative du stock d'hydrures métalliques.....48*
***Figure 41:** Caractéristique de concentration d'hydrogène en fonction de la pression.....49*
***Figure 42:** Mesures en continu du 25 juillet 1996.....52*
***Figure 43:** Mesures en continu du 26 juillet 1996.....53*
***Figure 44:** Mesures en continu du 27 juillet 1996.....54*
***Figure 45:** Mesures en continu du 28 juillet 1996.....55*
***Figure 46:** Mesures en continu du 29 juillet 1996.....52*

INTRODUCTION

Objet:
Cette étude a pour objet une installation de production d'hydrogène solaire située à Zollbrück, dans l'Emmental suisse, dans la maison familiale de la famille Friedli, qui l'a mis en place presque exclusivement sur fonds privés. Le champs photovoltaïque permet, une fois les besoins domestiques en électricité assurés, d'actionner un électrolyseur dont la production d'hydrogène sert de combustible à une cuisinière et à un véhicule à combustion sélectible essence / propane / hydrogène. Le solde de production électrique est par ailleurs injecté dans le réseau.

Il s'agit là d'une installation unique en son genre, la seule installation similaire en Suisse étant celle de la Station météorologique de Payerne, qui n'utilise cependant pas la production d'hydrogène à des fins énergétiques.

But:
Le but de cette étude a été d'évaluer le fonctionnement du système dans son ensemble, plus particulièrement la chaîne de production d'hydrogène, mais aussi d'étudier le fonctionnement et l'interconnexion des sous-systèmes, ainsi que d'évaluer les flux de matière et d'énergie qui les traverse.

Cette étude systémique devait permettre, outre une bonne compréhension des éléments en jeux, de caractériser le potentiel annuel de production d'hydrogène. A défaut d'une mesure annuelle (impossible vu la priorité secondaire de la production d'hydrogène face à l'approvisionnement en électricité domestique) la reconstitution du comportement global à partir du fonctionnement des parties permet en effet d'extrapoler le potentiel de production sur une année type.

Moyens:
Cette étude résulte d'un investissement de 7 hommes-mois, répartis de mai 1995 à avril 1997, ainsi que de divers apports ponctuels dont on trouvera mention au cours du travail et dans les remerciements. Elle a été cofinancée par le Centre d'étude des problèmes de l'énergie et le Laboratoire de cristallographie de l'Université de Genève.

Structure:
Ce rapport a été organisé de façon à permettre une lecture à différents niveaux. Il est ainsi structuré en trois parties, dont la première est menée parallèlement en français et en allemand alors que les deux autres, plus spécialisées, sont présentées en français seulement.

1) La partie principale est destinée à une

EINFÜHRUNG

Objekt:
Diese Studie befasst sich mit einer Solarwasserstoff Anlage, die sich in Zollbrück im Emmental befindet. Sie steht im Haus der Familie Friedli und wurde zum grössten Teil aus privaten Mitteln finanziert. Die Photovoltaikanlage deckt den Strombedarf des Hauses, wobei der Überschuss zum Betrieb eines Elektrolyseurs verwendet wird. Der produzierte Wasserstoff dient als Brennstoff für einen Kochherd und einen Minibus, welcher wahlweise mit Wasserstoff, Benzin oder Propan betrieben werden kann. Der übrigbleibende Strom kann auch ans Netz abgegeben werden.

Diese Anlage ist in der Schweiz einmalig. Die einzige gleichartige Anlage ist die der Wetterstation Payerne, welche aber den Wasserstoff nicht zu energetischen Zwecken braucht.

Ziel:
Ziel dieser Studie war die Abschätzung des gesamten Wasserstoffproduktionssystems, sowie seiner einzelnen Komponenten und deren Verbindungen. Insbesondere wurden die Material- und Energieflüsse untersucht.

Diese Systemanalyse erlaubte einerseits ein besseres Verständniss der einzelnen Elemente der Anlage, anderseits eine Berechnung des jährlichen Wasserstoffproduktionspotentials. Wegen der Zweitrangigkeit der Wasserstoffproduktion war es unmöglich dieses Potential über ein ganzes Jahr zu messen. Dieses konnte jedoch mit Hilfe der Systemanalyse rekonstruiert werden.

Mittel:
Diese Studie benötigte 7 Mann-Monate, verteilt auf die Zeit zwischen Mai 1995 und April 1997. Für einzelne Arbeiten war die Mithilfe von Spezialisten nötig, welche in den Danksagungen vermerkt sind. Die Studie wurde vom Centre d'étude des problèmes de l'énergie und vom Laboratoire de cristallographie der Universität Genf finanziert.

Struktur:
Dieser Bericht wurde so organisiert, dass er auf verschiedenen Ebenen gelesen werden kann. Dazu wurde er in drei Teilen strukturiert, von welchen der erste gleichzeitig auf Französisch und Deutsch durchgeführt werden, während die anderen zwei, hauptsächlich für Spezialiste, nur auf Französisch vorgestellt werden.

compréhension globale de l'installation. Elle comporte sa description et la représentation de son fonctionnement sur un jour type. Les résultats principaux de l'étude des sous-systèmes ainsi que les mesures sur quelques jours d'été sont alors présenté sous la forme d'un modèle entrée/sortie, grâce auquel pour un ensoleillement donné peuvent être établi la production instantannée d'hydrogène et les différentes pertes qui y sont liées. Ce modèle est ensuite utilisé pour établir le potentiel de production annuel de l'installation. Suivent les conclusions et les remerciements.

2) La seconde partie et destinée à une compréhension plus détaillée de l'installation et des processus physiques en jeux. Elle est structurée sous forme d'annexes. On y trouvera:
   - une description du système de mesure (liste des sondes et estimation des erreurs de mesure).
   - l'étude détaillée des sous-sytèmes, avec une fiche récapitulative pour chacun d'eux.
   - la présentation complète de la campagne de mesures en continu.
3) La dernière partie regroupe les informations complémentaires, à savoir:
   - une série de notes, regroupant tout recours à l'écriture mathématique.
   - la bibliographie.
   - une liste de constantes physiques, facteurs de conversion et définitions d'unités.

Les références se font par l'intermédiaire de nombres entre accolades (ex. {1}) en ce qui concerne les notes, de nombres entre parenthèses carrées (ex. [1]) en ce qui concerne la bibliographie.

1) Der Hauptteil ist für ein globales Verständniss der Anlage bestimmt. Er besteht zuerst aus seiner Beschreibung und der Darstellung seines Verhaltens an einem Durchschnittstag. Die wichtigsten Resultate der Untersystemanalyse sowie die Messungen über einige Sommertage werden dann in der Form eines Input/Output-Modells dargestellt, welches für eine bestimmte Sonneneinstrahlung die Berechnung der momentanen Wasserstoffproduktion sowie der damit verbundenen Verluste ermöglicht. Dieses Modell wird dann für die Berechnung des jährlichen Produktionspotentials gebraucht. Es kommen dann die Schlussfolgerungen und die Danksagungen.
2) Der zweite Teil ist für ein feineres Verständniss der Anlage und der physikalischen Prozesse bestimmt. Er ist in folgende Anhänge strukturiert:
   - eine Beschreibung des Messsystems (Sensorenliste und Abschätzung der Messgenauigkeit).
   - die genaue Untersuchung der Untersysteme, wobei jeder mit einer Zusammenfassungstabelle versehen ist.
   - die ausführliche Darstellung der kontinuierlichen Messkampagne.
3) Der letzte Teil besteht aus verschiedenen Zusatzinformationen:
   - eine Anzahl Bemerkungen, die jeglichen Zugriff zur mathematischen Schreibart enthalten.
   - die Bibliographie.
   - eine Liste von physikalischen Konstanten, Übergangsfaktoren und Einheitsdefinitionen.

Die Hinweise zur Bibliographie werden mittels rechteckigen Klammern gemacht (z.B. [1]), zu den Bemerkungen mittels geschwungenen Klammern (z.B. {1}).

DESCRIPTION DE L'INSTALLATION

Contexte:
L'installation en question s'inscrit dans une gestion énergétique de la maison basée entièrement sur des sources énergétiques renouvelables: le bois (exploité actuellement en Suisse en deçà de son taux de renouvellement) pour couvrir les besoins thermiques (chauffage) et le rayonnement solaire au travers de capteurs photovoltaïques, pour couvrir les besoins électriques, et au travers de capteurs thermiques, pour fournir un appoint thermique (préchauffage d'eau chaude).

Enchaînement des sous-systèmes:
L'installation se compose d'un champs de capteurs photovoltaïques orientés quasiment plein sud, branché à un transformateur de tension permettant un couplage optimum avec des deux principaux éléments avals: la série d'accumulateurs d'une part, desservant le réseau domestique au travers d'un onduleur DC/AC (première priorité), l'électrolyseur d'autre part (deuxième priorité). L'hydrogène produit par ce dernier étant trop impur pour les hydrures métalliques servant de stockage, il passe par un système de purification composé de trois éléments: un rinçage à l'eau pour éliminer les traces de potasse provenant de l'électrolyse; un condensateur pour réduire les traces restantes d'oxygène, par recombinaison avec l'hydrogène; un sécheur pour piéger les traces d'eau provenant de l'électrolyse, du bain de rinçage et du condensateur. Après passage dans un ballon collecteur servant de stock intermédiaire, l'hydrogène purifié est comprimé et injecté dans les hydrures. Il en est soutiré par dépression naturelle, soit vers la cuisinière, soit vers le stock à hydrures du véhicule.

Le solde de production photovoltaïque - dans l'utilisation actuelle - transite par un onduleur DC/AC et est ainsi injecté dans le réseau. Un redresseur AC/DC permet également, le cas échéant, de soutirer au réseau public l'électricité nécessaire à l'électrolyse. Les fonctions de contrôle de ce dernier ainsi que de l'appareil de régulation sont par ailleurs, pour des raisons de sécurité, directement branchés sur le réseau, ainsi que le compresseur dont la tension est incompatible avec celle du réseau domestique.

Les données de la régulation peuvent par ailleurs être transmise à un ordinateur PC où un logiciel développé à ce effet permet de les stocker et de les visualiser grâce à un ensemble de schémas graphiques de l'installation mis à jour en continu.

Sécurité
La sécurité de l'installation est assurée par un

BESCHREIBUNG DER ANLAGE

Hintergrund:
Die Anlage ist in ein vollständig auf erneuerbaren Energien basierendes Konzept eigebettet: Holz zur Deckung des Wärmebedarfs (zur Zeit wird in der Schweiz weniger Holz geschlagen als nachwächst) und Sonnenstrahlung, welche einerseits mittels Photovoltaikzellen den Strombedarf deckt, sowie anderseits mit thermischen Kollektoren das Warmwasser aufheizt.

Aufgliederung der Anlage in ihre Untersysteme:
Die Anlage besteht aus nach Süden ausgerichteten Sonnenkollektoren, welche ihre Stromproduktion über einen Spannungswandler an die beiden folgenden Hauptelemente liefern: einerseits die Akkumulatoren, welche mittels eines Wechselrichters das Hausnetz versorgen (erste Priorität), anderseits der Elektolyseur (zweitrangig). Der produzierte Wasserstoff ist zu unrein, um direkt in den Metallhydridspeicher gefüllt zu werden, und muss deshalb ein dreistufiges Reinigungssystem durch-laufen: zuerst eine Wasserspülung zur Entfernung der Kalilauge des Elektrolyseurs; dann einen Kondensator, welcher durch Rekombination mit Wasserstoff den restlichen Sauerstoff eliminiert; als letztes einen Trockner zur Entfernung der Feuchtigkeit. Der gereinigte Wasserstoff wird in einem Zwischenspeicher gelagert, bevor er in den Metallhydridspeicher komprimiert wird. Von dort aus wird der Wasserstoff entweder in den Metallhydridspeicher des Fahrzeuges umgefüllt oder im Kochherd verbrannt. In beiden Fällen ist kein Energieaufwand nötig, da die Druckdifferenz vewendet wird.

Der nicht verwendete Solarstrom wird zurzeit über einen Wechselrichter ins öffentliche Netz eingespeist. Umgekehrt erlaubt ein Gleichrichter es auch den Elektrolyseur ab Netz zu betreiben. Aus Sicherheitsgründen ist die Steuerung der gesamten Anlage ans öffentliche Netz angeschlossen. Da die Betriebsspannung des Kompressors nicht mit der Spannung des Hausnetzes übereinstimmt, wird dieser ebenfalls direkt ab Netz betrieben.

Die Steuerungsdaten können auf einen PC übertragen werden, wo ein speziell entwickeltes Program diese Daten graphisch darstellen und speichern kann.

Sicherheit
Die Anlage ist mit einem

sytème de détection des éventuelles fuites d'hydrogène, causant l'enclenchement d'un signal d'alarme sonore et visuel. Au delà de trois minutes d'alarme le stock d'hydrogène est par ailleurs automatiquement vidé vers l'atmosphère où contrairement aux combustibles habituels (propane, vapeur d'essence) il s'enfuit immédiatement en hauteur grâce à un poids spécifique 14 fois plus petit que l'air. Un gage supplémentaire de sécurité est le stockage en hydrures métalliques (ces derniers ne libérant même en cas de rupture l'hydrogène qu'en relativement faible débit) ainsi qu'un local séparé pour le ballon de stockage intermédiaire. En 6 années de fonctionnement aucun incident notoire n'a par ailleurs jamais eu lieu.

Wasserstoffsensorensystem abgesichert, der allfällige Lecke über ein Licht- und Tonsignal meldet. Nach dreiminütigem Alarm wird der Wasserstoffvorrat automatisch in die Atmosphäre entleert, wo er im Gegensatz zu gewöhnlichen Brennstoffen (Propan, Benzindämpfe) wegen 14 Mal kleinerem spezifischen Gewicht sofort in die Höhe entweicht. Eine zusätzliche Sicherheitsmassnahme besteht im Metallhydridspeicher (der Wasserstoff auch bei Riss nur in relativ kleinem Fluss entweichen lässt), sowie im separat gebauten Lokal des Zwischenspeichers. In 6 Jahren Betrieb fand somit kein notorischer Zwischenfall statt.

Transformations et pertes énergétiques:

Le captage photovoltaïque transforme une forme d'énergie de basse valeur (le rayonnement solaire), en une forme d'énegie de haute valeur (l'électricité), appropriée au fonctionnement d'une multitude d'utilisations techniques, mais actuellement pas stockable en grande quantité. Grâce à l'électrolyse (ou la recharge des accumulateurs) elle est alors transformée sous forme chimique. Lors de ce processus l'hydrogène présente les avantages suivants face aux accumulateurs: pas de perte par autodécharge ainsi que transvasement relativement facile d'un réservoir à un autre. Par l'intermédiaire d'une pile à combustible l'énergie contenue dans l'hydrogène peut à nouveau être ramenée sous forme électrique (ce qui n'est pas le cas ici). L'autre possibilité, utilisée ici, est de la transformer sous forme mécanique en brûlant l'hydrogène dans un moteur thermique. Dans les deux cas la réaction chimique ne produit pour ainsi dire rien d'autre que de la vapeur d'eau et est ainsi libre d'émissions polluantes.

Comme dans toute transformation énergétique chacun des processus décrits ci-dessus s'accompagne d'une perte énergétique sous forme de chaleur rendue à l'environnement.

Energieumwandlung und Verluste:

Mittels der Photovoltaik wird eine niederwertige Energieform (Sonnenstrahlung) in eine hochwertige (Elektrizität) umgewandelt, welche zwar für eine Vielzahl von technischen Anwendungen geeignet ist, aber zurzeit in grossen Mengen nicht direkt speicherbar ist. Mittels Elektrolyse (oder Ladung des Akkumulators) wird die elektrische Energie in chemische umgewandelt. Dabei bietet der Wasserstoff gegenüber dem Akkumulator folgende Vorteile: kein Energieverlust durch Selbsentladung, relativ einfaches Umfüllen von einem Speicher in einen anderen. Mittels einer Brennstoffzelle kann die im Wasserstoff enthaltene chemische Energie bei Bedarf wieder in Elektrizität umgewandelt werden (was in dieser Anlage nicht der Fall ist). Die andere Möglichkeit besteht darin, den Wasserstoff zu verbrennen um thermische oder mechanische Energie zur Verfügung zu haben. In beiden Vorgängen erzeugt die chemische Reaktion praktisch nichts anderes als Wasserdampf und ist somit frei von schädlichen Abgasen.

Wie bei jeder Energieumwandlung sind die oben beschriebenen Prozesse mit einem Energieverlust (Wärmeabgabe an die Umwelt) verbunden.

Utilisation rationnelle du rayonnement solaire:

L'installation telle qu'elle se présente aujourd'hui résulte de quelques six années de mise en places et adaptations successives. Un grand effort a notamment été nécessaires pour coupler entre eux les différents éléments du système (essentiellement tous de provenance commerciale), et les adapter au comportement extrêmement dynamique du rayonnement solaire. Le caractère ramifié de l'installation résultante lui confère une grande flexibilité et donc un fort potentiel d'utilisation rationnelle de l'énergie incidente: le choix d'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour l'électrolyse, l'accumulation en batterie ou l'injection sur le réseau peut ainsi se faire selon l'état de charge des batteries et du

Rationelle Nutzung der Sonnenstrahlung:

In ihrem heutigen Zustand stellt die Anlage das Resultat einer sechsjährigen Entwicklungs- und Anpassungsarbeit dar. Dabei stellten einerseits die Verbindungen der einzelnen auf dem Markt erhältlichen Elemente des Systems sowie anderseits deren Anpassung an die extremen Schwankungen der Sonnenstrahlung die grössten Probleme. Die Netzförmige Auslegung der Anlage erlaubt eine flexible und dadurch effiziente Ausnützung der Sonnenenergie: Je nach Ladezustand des Metallhydridspeichers und des Akkumulators wird zwischen Batterieladung, Abgabe ans Netz und Wasserstoffproduktion gewählt, wobei letztere aufgrund des Leistungsbedarfs des Elektrolyseurs erst ab einer

stock d'hydrures métalliques, ainsi que la puissance de l'ensoleillement, dont une valeur trop faible est prohibitive pour la production d'hydrogène. Actuellement la sélection du mode d'utilisation est cependant encore manuelle.

Délimitation du champs de l'étude:
Nous nous sommes dans cette étude limité à l'analyse de la chaîne de production d'hydrogène (colonne de gauche dans le schéma de flux, figure 1, à l'exception du transfert du stock fixe au stock mobile du véhicule, et de la combustion).

gewissen Sonnenstrahlung möglich ist. Zurzeit wird zwischen diesen Möglichkeiten noch von Hand gewählt.

Abgrenzung des untersuchten Teils der Anlage:
In der folgenden Studie haben wir uns auf die Untersuchung der Wasserstoffproduktion beschränkt (linke Spalte im Flussdiagram, Fig. 1, unter Ausschluss des Fahrzeugteiles).

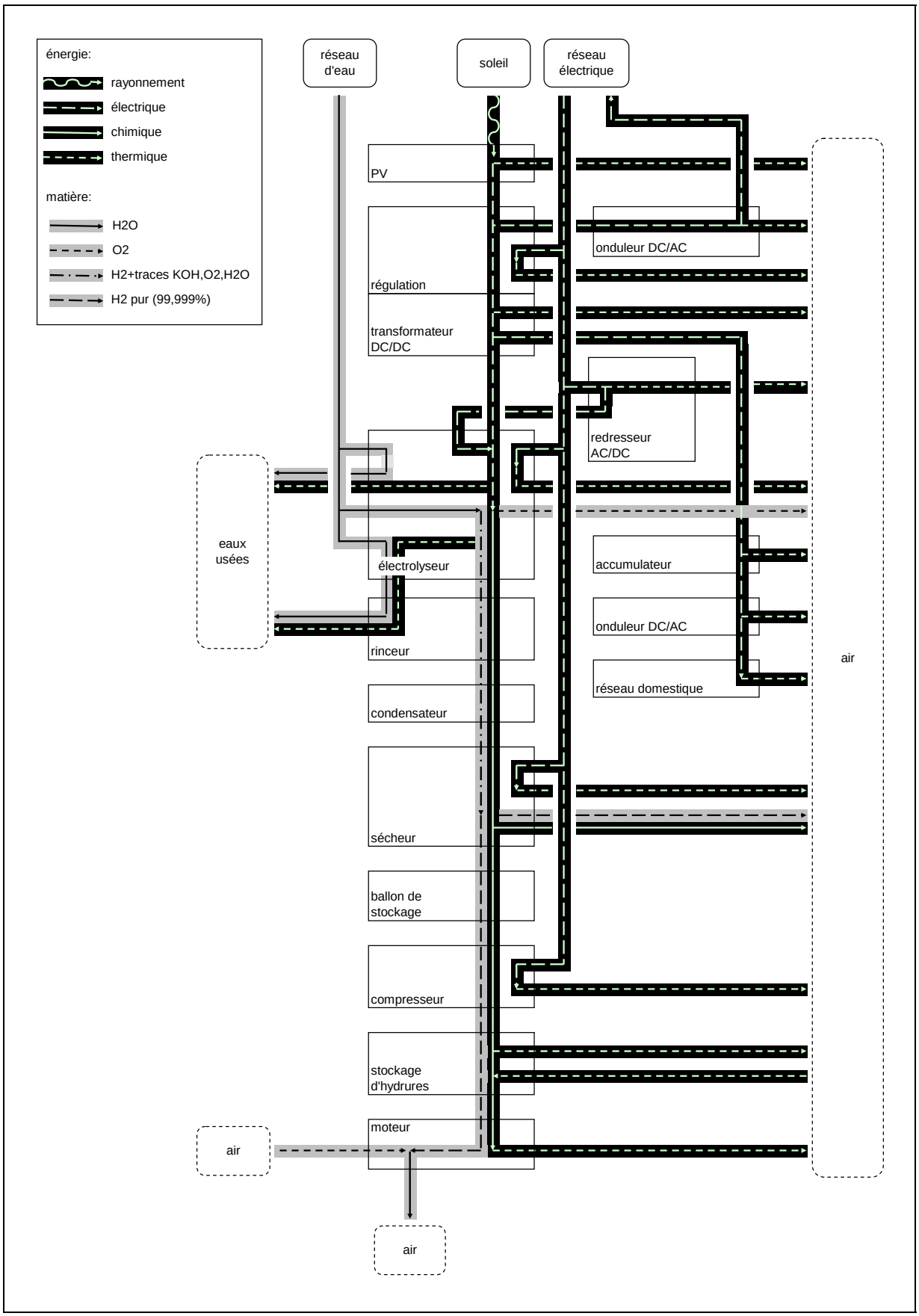


Figure 1: *Schéma de l'installation avec flux d'énergie et de matière: chaîne de production d'hydrogène (colonne de gauche) ainsi que stockage sur accumulateur et injection sur réseau (colonne de droite).*

Figur 1: *Schema der Anlage mit Energie- und Materialfluss: Wasserstoffproduktion (linke Spalte) sowie Speicherung im Akkumulator und Abgage ans Netz (rechte Spalte).*

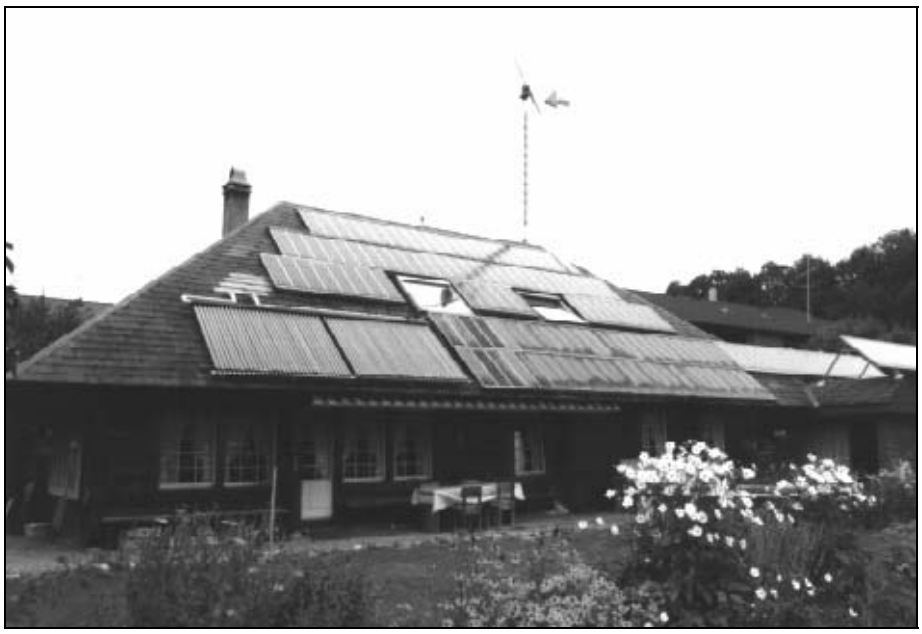


Figure 2: *Champs photovoltaïque: les 162 panneaux prennent la plus grande superficie du pan sud du toit. On distingue également les capteurs thermiques en bas à gauche et une éolienne autoconstruite, dont la production dessert une lampe extérieure.*
Figur 2: *Photovoltaikanlage: die 162 Pannels bedecken den grössten Teil des Süddaches. Im weiteren erkennt man die Warmwasserkollektoren (unten links auf dem Dach), sowie einen selbstgebauten Windgenerator, dessen Produktion für die Aussenbeleuchtung verwendet wird.*

Figure 3: *Transformateur DC/DC permettant d'adapter de manière optimale la puissance photovoltaïque à la caractéristique de l'électrolyseur, respectivement des accumulateurs. Sur le panneau avant on distingue les fusibles permettant de sélectionner le mode d'utilisation désiré.*
Figur 3: *Spannungswandler zur optimalen Anpassung der Photovoltaikleistung an den Elektrolyseur oder den Akkumulator. Auf der Frontplatte erkennt man die Schalter zur Wahl des Betriebsmodus.*

Figure 4: *L'électrolyseur vu de face, avec un tableau de bord permettant de suivre l'état de l'électrolyseur et des différents sous-systèmes avals.*

Figur 4: *Frontansicht des Elektrolyseurs, mit Anzeigetafel zur Überwachung des Elektrolyseurs und der nachfolgenden Systemkomponenten.*

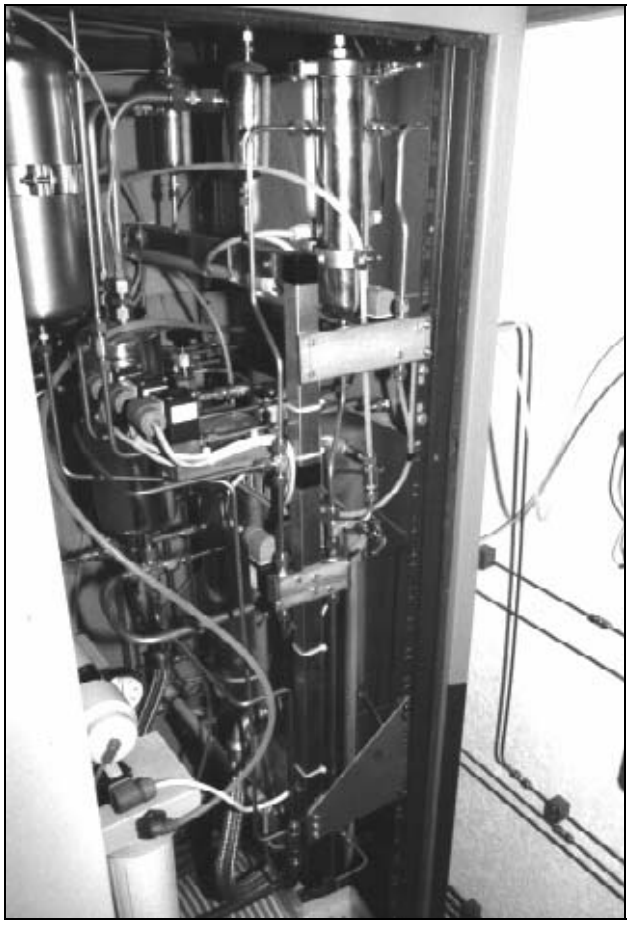


Figure 5: *L'électrolyseur vu de côté. Tout en bas on distingue le bloc de 16 cellules dans lequel a lieu l'électrolyse; au dessus (en blanc) le mécanisme d'apport d'eau; tout en haut à droite et au fond, les récipients permettant de recueillir les gaz d'hydrogène et d'oxygène et de les refroidir à température du réseau d'eau.*

Figur 5: *Seitenansicht des Elektrolyseurs. Unten links erkennt man die 16 Zellen in denen sich die Elektrolyse abspielt; darüber erkennt man die Wasserzufuhr; oben und rechts hinten die Behälter, welche zum Auffangen und Abkühlen des Wasserstoffes beziehungsweise des Sauerstoffes dienen.*

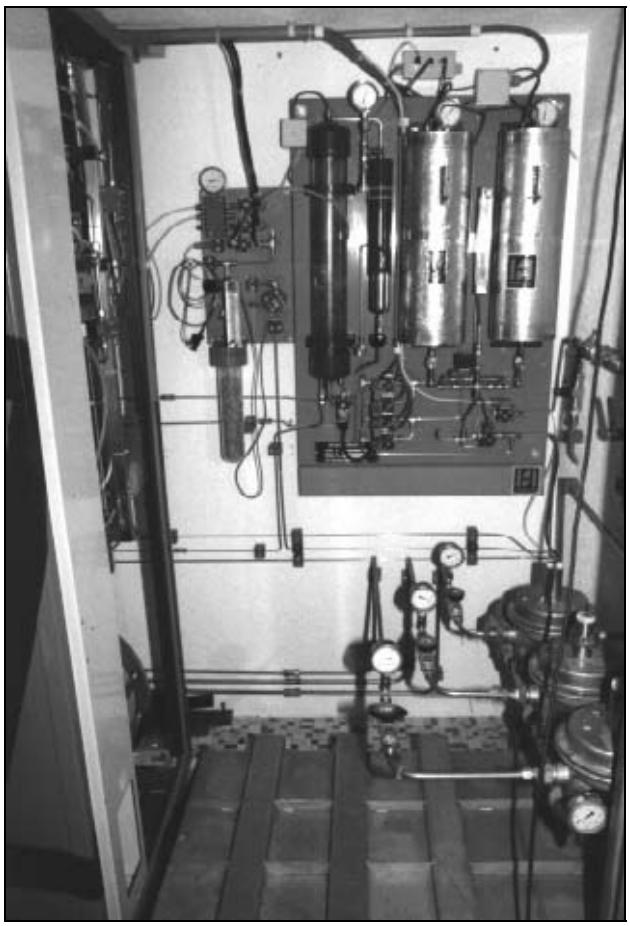


Figure 6: *Purificateur/sécheur sur le mur du fond. Au sol le stock d'hydrures métalliques d'une épaisseur de 13 cm. Afin d'y être compressé l'hydrogène est d'abord recueilli dans un ballon collecteur situé pour des raisons de sécurité en dehors du local de production*.

Figur 6: *Auf der Rückwand sieht man die Reinigungs- und Trocknungsanlage. Der 13 cm hohe Metallhydridspeicher befindet sich auf dem Boden. Der Zwischenspeicher, in dem der Wasserstoff vor der Komprimierung gelagert wird, befindet sich aus Sicherheitsgründen ausserhalb des Produktionsraumes*.

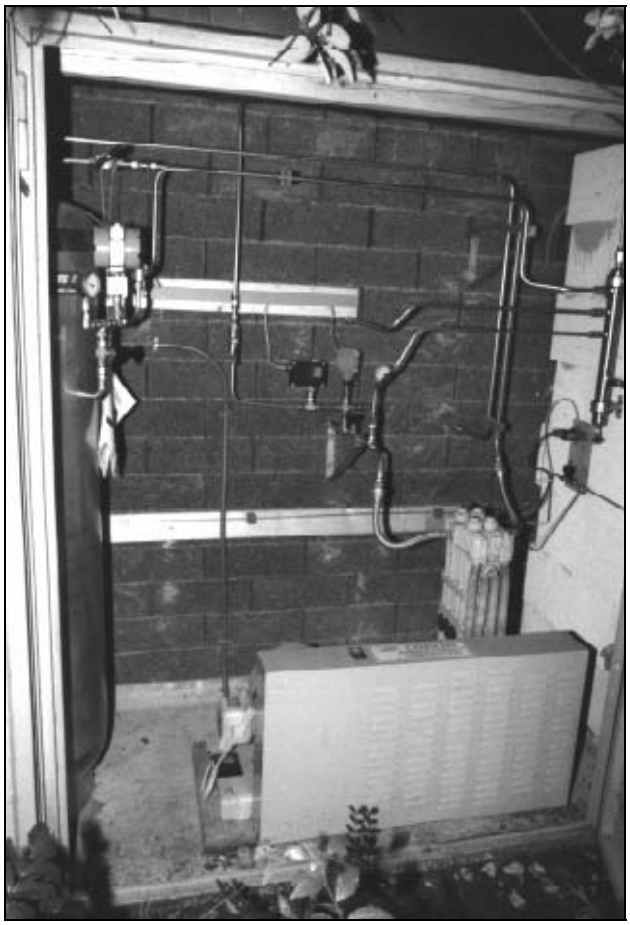


Figure 7: *Ballon collecteur (qui apparaît sur la gauche de l'image) et compresseur (par terre).*

Figur 7: *Zwischenspeicher (am linken Bildrand) und auf dem Boden stehender Kompressor.*

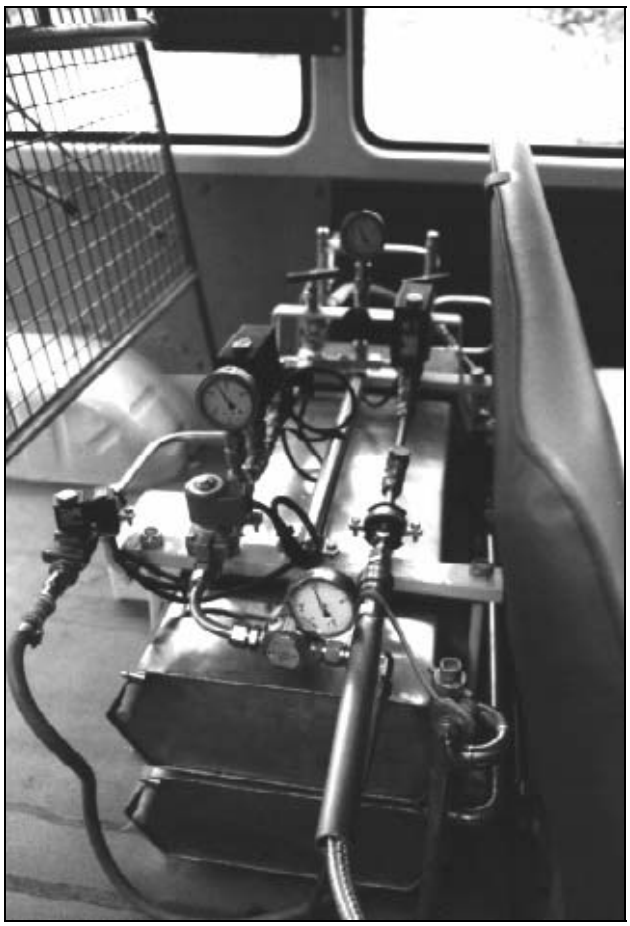


Figure 8: *Stock d'hydrures métalliques du minibus, fixé sur la plate-forme arrière.*
Figur 8: *Der Metallhydridspeicher des Fahrzeuges ist auf der Ladefläche befestigt.*

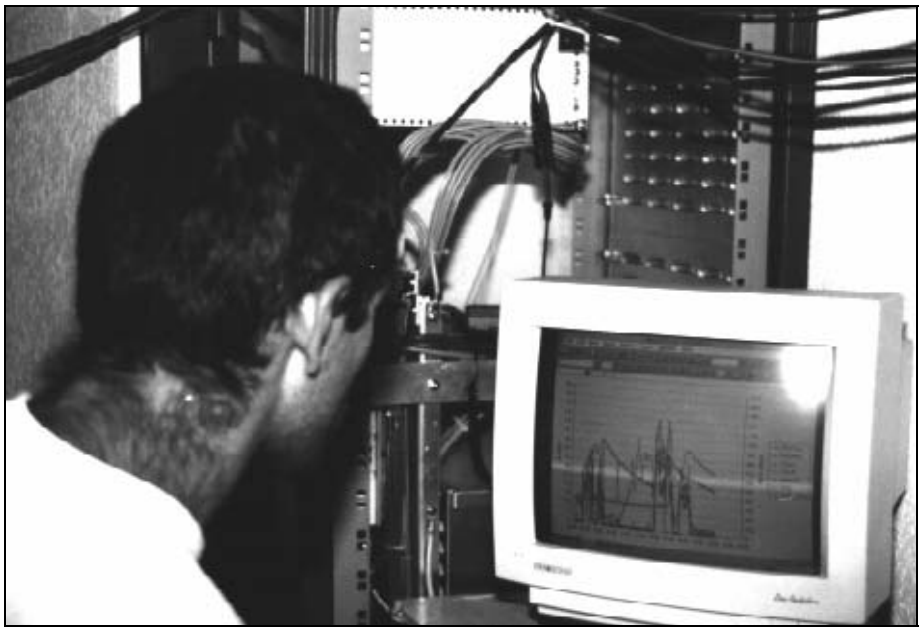


Figure 9: *Système de visualisation. Les valeurs instantanées de l'état du système sont affichés dans un environnement graphique et périodiquement envoyés pour stockage dans une feuille de calcul.*
Figur 9: *Überwachung und Datenaufzeichnung mittels PC. Der momentane Systemzustand wird auf dem Bildschirm graphisch dargestellt sowie periodisch als Excel Datenblatt gespeichert.*

COMPORTEMENT SUR UN JOUR TYPE

Le fonctionnement typique de l'installation s'observe à partir de mesures en continu, dont nous présentons ici l'évolution temporelle pour un beau jour d'été, à savoir le 26 juillet 1996. L'analyse faite ici peut aisément être reprise pour les autres journées de notre campagne de mesure (cf. annexe 3), à ensoleillement variable ou sujettes à un mode de production différent (réseau ou champs photovoltaïque partiel).

Production:
La figure 10 retrace la production brute d'hydrogène (à la sortie de l'électrolyseur) en fonction de l'ensoleillement. On distingue clairement la corrélation entre ensoleillement et courant d'électrolyse, ainsi que les phénomènes d'enclenchement et d'arrêt de production à ensoleillement insuffisant (puissance photovoltaïque trop basse, induisant une mauvaise séparation des gaz d'hydrogène et oxygène). On remarque aussi la montée en température de l'électrolyte en début de journée, jusqu'à l'atteinte de sa valeur de consigne. Remarquons encore que la production d'hydrogène présentée sur ce graphique n'est pas une mesure à proprement parler, mais un calcul de conversion à partir de la mesure du courant d'électrolyse {3}.

Purification:
La figure 11 retrace le fonctionnement du purificateur/sécheur nécessaire à l'obtention d'hydrogène extrêmement pur (99,999%), pour éviter la contamination des hydrures. On distingue clairement l'utilisation alternative des deux filtres moléculaires du sécheur (cycles de montée/descente en température). L'un d'eux, actif, est traversé par l'arrivée d'hydrogène dont il piège les traces d'eau, pendant que l'autre, passif, est régénéré par chauffage à 90°C et élimination des vapeurs d'eau par un flux d'hydrogène propre (ce qui diminue évidemment la production nette d'hydrogène). Une fois le filtre actif saturé, son rôle est inversé avec le filtre qui vient d'être régénéré. La représentation de la fraction temporelle pendant laquelle la vanne de regénération est ouverte montre par ailleurs que la régénération est suspendue pendant la phase de montée en température, pour être rattrapée pendant les premières cinq à dix minutes de phase de maintient (regénération pendant 100% du temps) et tomber ensuite à sa valeur moyenne de 50%. Si besoin est (par exemple vers 11 heures ce jour-là) la régénération est à nouveau augmentée à 100% en fin de cycle de purification.

On trouve sur la figure 11 une comparaison

BETRIEBSVERHALTEN AN EINEM DURCHSCHNITTSTAG

Das typische Verhalten der Anlage wird an Hand von kontinuierlichen Messungen beobachtet. Wir stellen hier den zeitlichen Ablauf eines schönen Sommertages, den 26. Juli 1996, dar. Die hier durchgeführte Untersuchung kann durchaus auch auf die anderen Tage unserer Messkampagne übertragen werden (siehe Anhang 3), an welchen die Sonneneinstrahlung variierte oder ein anderer Betriebsmodus gewählt wurde.

Produktion:
Figur 10 stellt die Bruttowasserstoffproduktion (Ausgang Elektrolyseur) in Funktion der Sonneneinstrahlung dar. Die Graphik zeigt einen klaren Zusammenhang zwischen der Sonneneinstrahlung und dem Elektrolysestrom. Im weiteren sieht man auch das An- und Abschalten beim Unter- bzw. Überschreiten des Leistungsgrenzwertes, welches für die Wasserstoffproduktion notwendig ist (für zu geringe Elektrolyseströme ist die Trennung von Wasserstoff und Sauerstoff ungenügend, es besteht die Gefahr von Knallgasbildung). Am Anfang des Tages beobachtet man auch den Temperaturanstieg des Elektrolytes bis zur Betriebstemperatur. Es ist anzumerken, dass die auf der Grafik dargestellte Wasserstoffproduktion nicht eine Messung im eigentlichen Sinne, sondern eine Berechnung aufgrund des Elektrolysestromes ist {3}.

Reinigung:
Figur 11 zeigt die Funktion des Reinigungssystems, welches zur Erreichung des extremen für die Metallhydride notwendigen Reinheitsgrades des Wasserstoffs (99,999%) benötigt wird. Die alternierende Benützung der beiden Molekularfilter der Trocknungsanlage ist dabei gut ersichtlich (auf- und absteigende Temperaturzyklen). Der zu trocknende Wasserstoff fliesst jeweils durch den aktiven Filter, während der andere Filter durch elektrische Aufheizung auf 90°C sowie Spülung mit gereinigtem Wasserstoff regeneriert wird (was natürlich die Nettowasserstoffproduktion verringert). Sobald der aktive Filter mit Wasser gesätigt ist, werden die Rollen der beiden Filter ausgetauscht. Die Darstellung des Zeitanteiles, während dem der Regenerationshahn offen ist, zeigt ausserdem, dass die Regeneration während dem Temperaturanstieg gesperrt ist, um während den ersten fünf bis zehn Minuten der Betriebsphase rückgewonnen zu werden (100%-zeitige Regeneration) und schliesslich zu ihrem Mittelwert von 50% zu sinken. Wenn nötig wird die Regeneration dann am Ende des Zyklus wieder auf 100% eingestellt.

Im weiteren findet man auf der Figur 11 einen dynamischen Vergleich der Brutto- und

dynamique des production d'hydrogène brute (à la sortie de l'électrolyseur) et nette (à la sortie du sécheur). Cette dernière a un comportement très fluctuant qui est dû à la méthode de mesure par différentielle de pression (cf. annexe 2). Cette méthode induit un erreur importante dans l'évaluation instantanée du débit, corrigé cependant par cumulation sur une période de production plus longue.

Nettowasserstoffproduktion (Ausgang Elektrolyseur, beziehungsweise Ausgang Trocknungsanlage). Letztere weist sehr grosse Schwankungen auf, welche auf die angewandte Messmethode (Druckdifferenz-messung) zurückzuführen sind. Diese Methode ergibt für den momentanen Fluss einen relativ hohen Messfehler, der aber Dank einer Summe von Messungen über eine Produktionsspanne korrigiert wird.

Stockage intermédiaire:

On observe sur la figure 12 la dynamique très simple du ballon collecteur, qui se remplit (montée en pression) en fonction de la production d'hydrogène, à concurrence de sa valeur de consigne. Une fois celle-ci atteinte, le compresseur se met en marche, vide le ballon et injecte l'hydrogène dans le stock d'hydrures.

Zwischenspeicherung:

Figur 12 beschreibt die sehr einfache Dynamik des Expansionsgefässes, bei welchem der Druck in Funktion der Wasserstoffproduktion bis zum Maximalwert ansteigt. Ist dieser erreicht, pumpt der Kompressor den Wasserstoff vom Expansionsgefäss in den Metallhydridspeicher.

Stockage final:

La figure 13 montre le comportement du stock d'hydrures. A chaque injection (compression) la pression augmente brutalement pour redescendre gentiment vers sa valeur d'équilibre, attestant de l'absorption de l'hydrogène dans les hydrures, sous forme de liaison avantageuse en volume (baisse de pression) et en énergie (élévation de la température, par libération de chaleur). Contrairement à la pression la température augmente de façon continue même après la compression. Ceci provient de la non-utilisation du circuit de thermalisation prévu à cet effet, empêchant l'équilibre thermique d'avoir lieu suffisamment vite. Dans ces conditions il n'est pas possible d'utiliser la totalité de la capacité de stockage des hydrures, ainsi que le montre la nécessité de recourir ce jour-là par deux fois au soutirage.

Speicherung:

Figur 13 zeigt das Verhalten des Metallhydridspeichers. Jedesmal, wenn der Kompressor Wasserstoff in den Speicher pumpt, steigt der Druck steil an, um danach langsam auf seinen Gleich-gewichtswert abzusinken, was auf die Absorption des Wasserstoffes durch das Metallpulver zurürckzuführen ist. Dieser Vorgang reduziert einerseits das notwendige Volumen (Druckabfall), anderseits die Bindungsenergie (Temperatur-anstieg). Im Gegensatz zum Druck steigt die Temperatur nach dem Kompressorbetrieb ständig weiter. Dies ist ein Zeichen, dass der vorgesehene Kühlkreislauf nicht in Betrieb ist und der Speicher seinen thermodynamischen Gleichgewichtswert nicht genügend schnell erreichen kann. Unter diesen Umständen ist es nicht möglich, die volle Speicherkapazität auszunützen, was die zweimalige Entleerung während dieses Tages nötig macht.

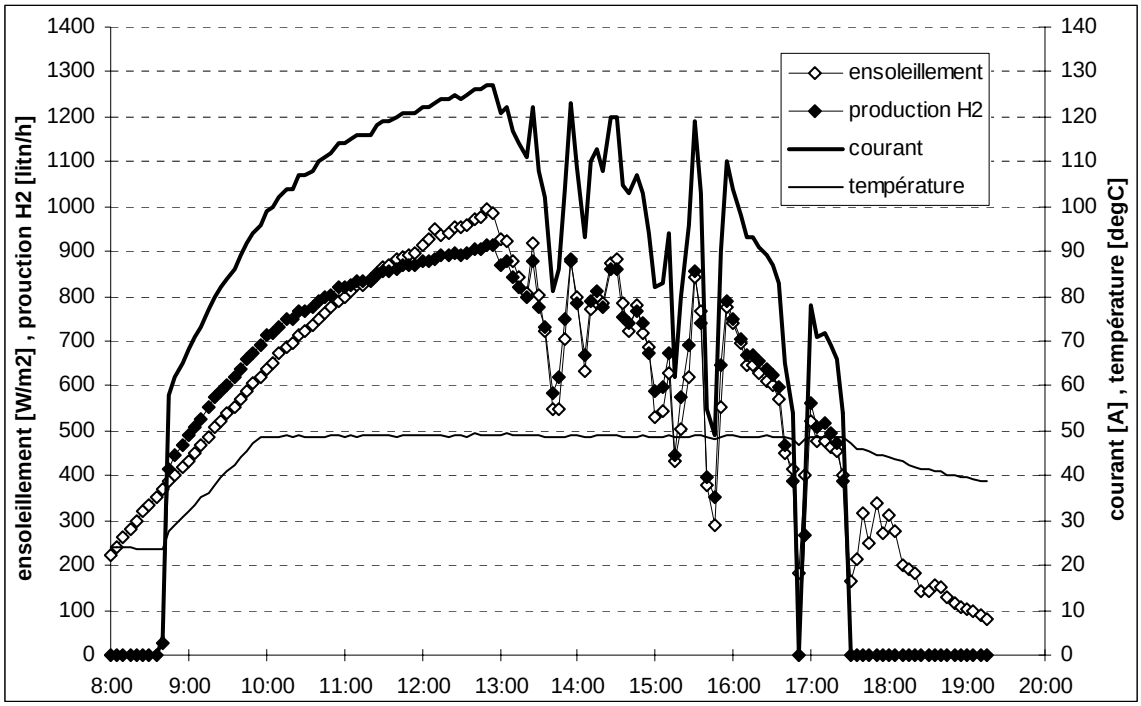


Figure 10: Evolution dynamique de l'électrolyseur le 26 juillet 1996: ensoleillement, courant et température d'électrolyse, production d'hydrogène.

Figur 10: *Dynamisches Verhalten des Elektrolyseurs am 26.Juli 1996: Sonneneinstrahlung, Stromaufnahme und Temperatur des Elektrolyseurs, Wasserstoffproduktion.*

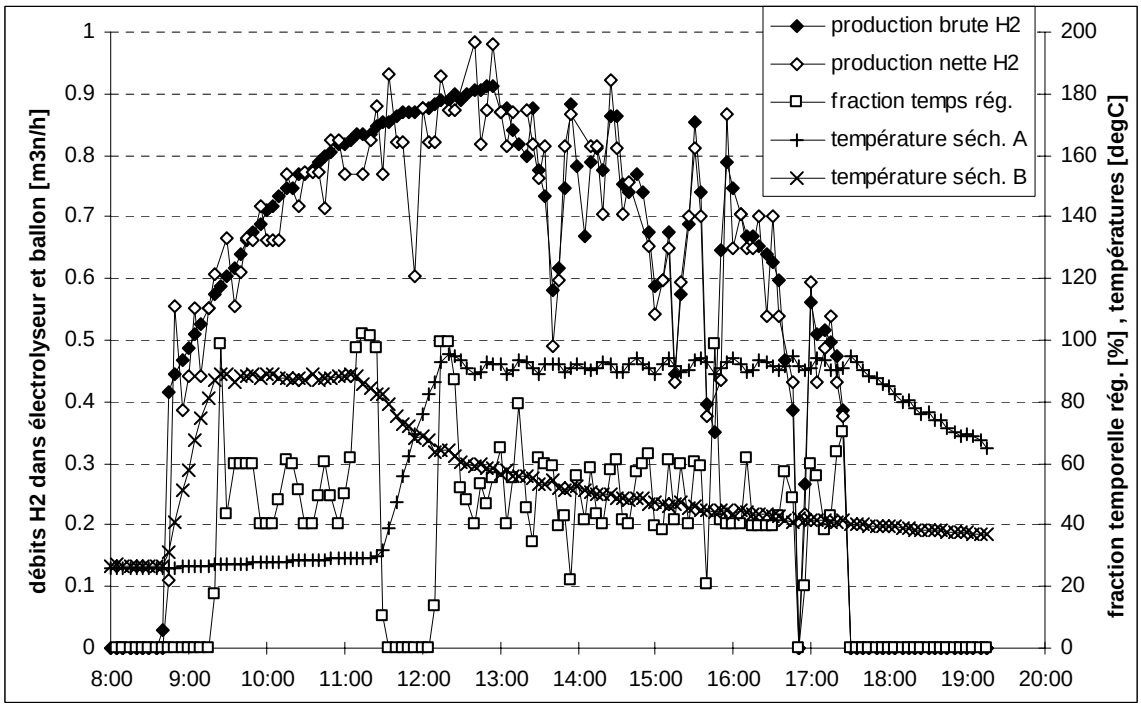


Figure 11: *Evolution dynamique du sécheur le 26 juillet 1996: productions d'hydrogène brute et nette, températures des deux bottes de séchage, fraction temporelle de régénération.*

Figur 11: *Dynamisches Verhalten des Reinigungssystems am 26.Juli 1996: Brutto- und Nettowasserstoffproduktion, Temperatur der beiden Filter, Zeitanteil der Regeneration.*

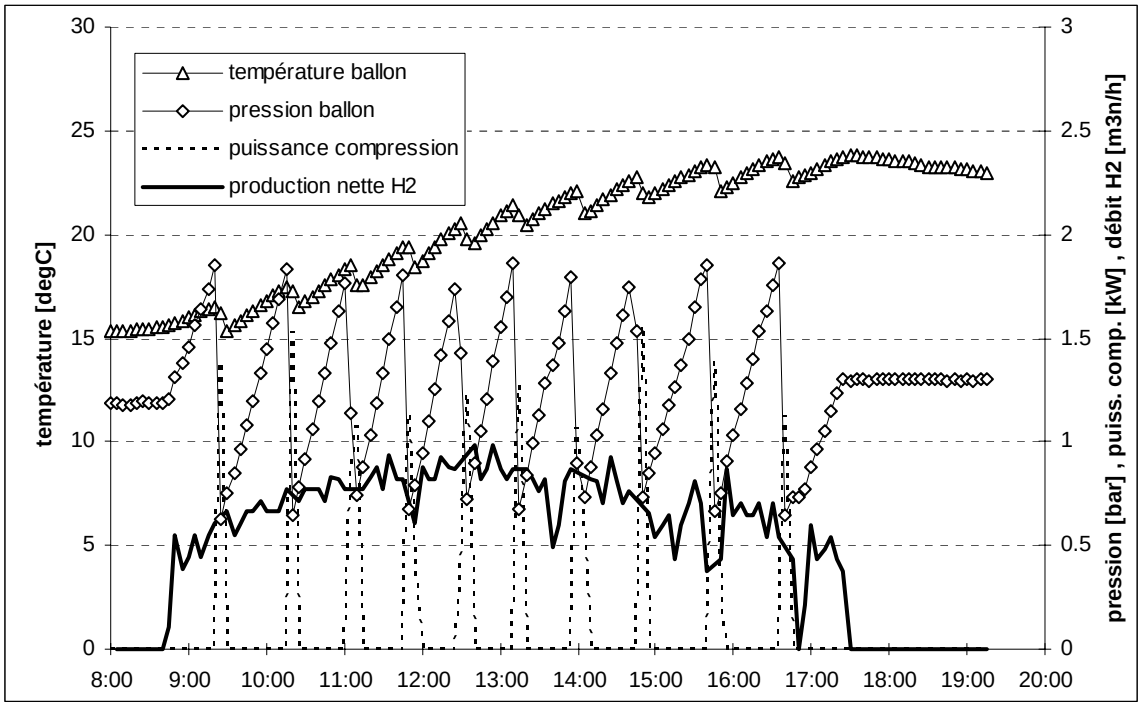


Figure 12: *Evolution dynamique du ballon collecteur le 26 juillet 1996: production nette d'hydrogène, puissance électrique du compresseur, pression et température.*
Figur 12: *Dynamisches Verhalten des Zwischenspeichers am 26.Juli 1996: Nettowasserstoffproduktion, Kompressorleistungsaufnahme, Druck und Temperatur.*

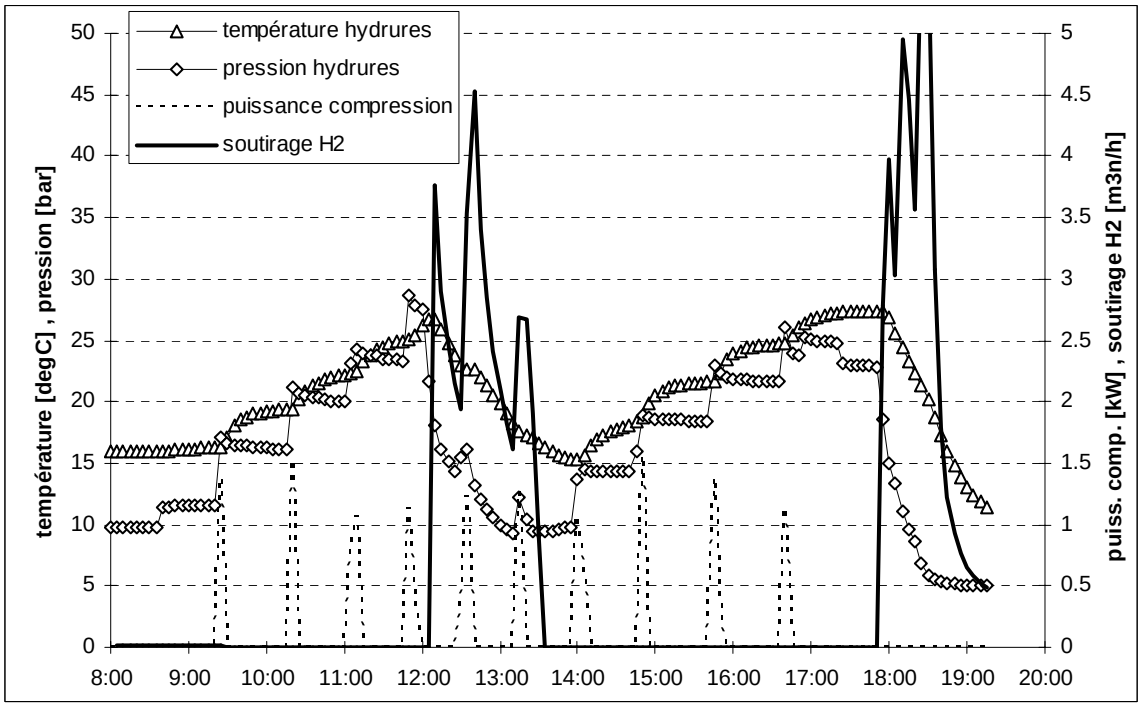


Figure 13: *Evolution dynamique du stock d'hydrures le 26 juillet 1996: pression, température, puissance électrique du compresseur et soutirage.*
Figur 13: *Dynamisches Verhalten des Metallhydridspeichers am 26.Juli 1996: Druck, Temperatur, Kompressorleistungsaufnahme und Wasserstoffentnahme.*

MODELE ENTREE/SORTIE ET PRODUCTION POTENTIELLE

Modèle entrée/sortie:

L'étude détaillée de chacun des sous-système et de leur interconnexion les uns aux autres (cf. annexe 2) permet de recalculer pas à pas la production d'hydrogène du système pour un ensoleillement donné (cf. figure 14). La possibilité d'une telle démarche provient de l'absence essentielle d'inertie, la réponse du système étant quasiment immédiate.

INPUT/OUTPUT-MODELL UND PRODUKTIONSPOTENTIAL

Input/Output-Modell:

Die detaillierte Untersuchung der Untersysteme und ihrer Verbindungen (siehe Anhang 2) erlaubt eine Berechnung der Wasserstoffproduktion für eine gegebene Sonneneinstrahlung (siehe Figur 14). Da das System keine Trägheit besitzt, reagiert es ziemlich direkt auf Aenderungen der Sonneneinstrahlung, was ein solches Vorgehen erlaubt.

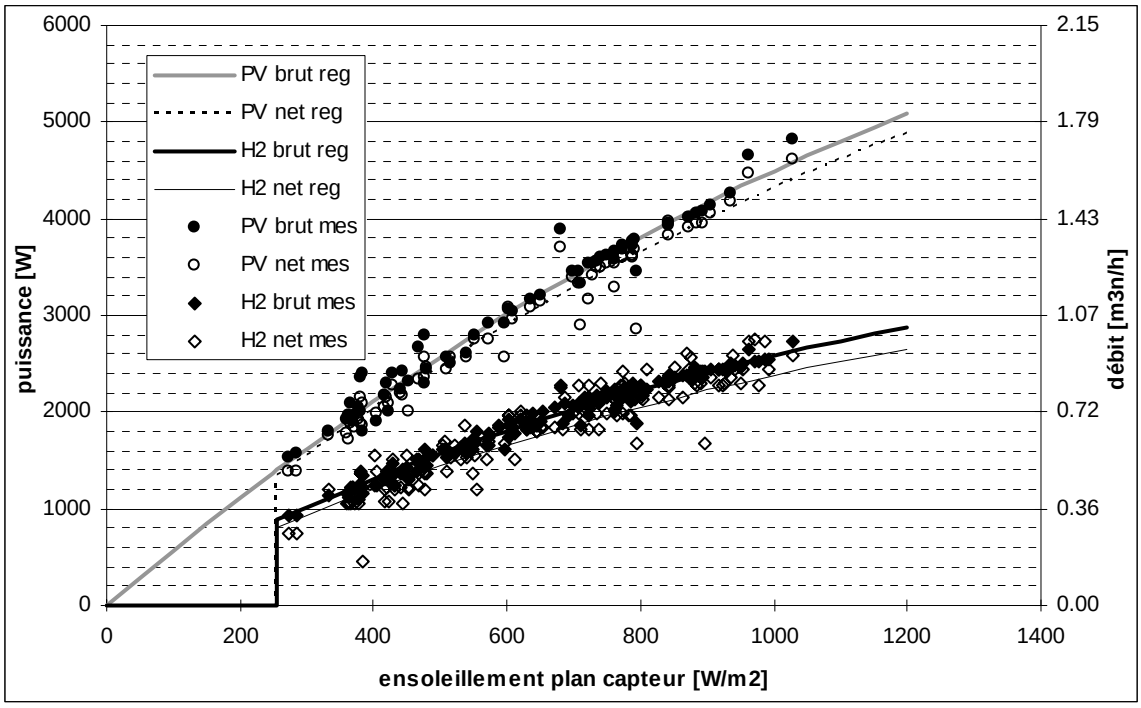


Figure 14: *Modèle entrée/sortie du captage estival du rayonnement solaire sur plan capteur et de sa conversion en hydrogène: PV: captage photovoltaïque brut (champs photovoltaïque) et net (transformateur DC/DC); H2: production d'hydrogène brut (électrolyseur) et net (purificateur). L'acronyme «mes» correspond aux mesures en continu sur trois jour d'été par pas de temps de 5 minutes, l'acronyme «reg» au modèle de calcul tiré de l'analyse des sous-systèmes et des régressions correspondantes.*

Figure 14: *Input/Output-Modell der sommerlichen Photovoltaikproduktion und deren Umwandlung in Wasserstoff: PV: Brutto- und Nettostromproduktion (Ausgang Solarzellen, respektive Spannungswandler). H2: Brutto- und Nettowasserstoffproduktion (Ausgang Elektrolyseur, respektive Trocknungssystem). Die Zusatzbezeichnung «mes» steht für kontinuierliche Messungen im 5 Minutentakt über drei Sommertage, die Bezeichnung «reg» für die berechneten Werte.*

La démarche est la suivante:

1) Calcul de la puissance photovoltaïque des 65.2 m2 de capteurs. L'efficacité de captage diminue avec l'ensoleillement, à cause de l'élévation en température des panneaux. Cette élévation dépend également de la température extérieure et donc de la saison. L'efficacité de captage de base est ainsi de 9.7% en été, 10.1% en mi-saison et 10.4% en hiver. En première approximation cette efficacité baisse de 0.28% par 100 W/m2

Das Vorgehen ist folgendes:

1) Berechnung der Photovoltaikleistung der 65.2 m2 Sollarzellen. Der Wirkungsgrad der Solarzellen nimmt mit steigender Sonneneinstrahlung auf Grund der Temperaturerhöhung der Zellen ab. Die Zellentemperatur hängt im weiteren auch von der Aussentemperatur und damit von der Jahreszeit ab. Es kann also von einem Basiswirkungsgrad von 9.7% für den Sommer, 10.1% für die Zwischensaison und 10.4% für den Winter ausgegangen werden. In

d'ensoleillement en été et en mi-saison, de 2.3% en hiver. Une estimation plus fine passe par un modèle complexe tel le logiciel Pvsyst [4].

2) Calcul de la puissance de sortie du transformateur DC/DC, via son efficacité moyenne de 96%. Cette puissance ne sera injectée dans l'électrolyseur que si la puissance photovoltaïque est supérieure à la valeur de consigne, qui est de 1400 W si l'électrolyseur est en marche, de 1800 W s'il est à l'arrêt (hystérèse permettant d'éviter les enclenchements/arrêts répétés lors de météo variable).
3) Calcul de la production brute d'hydrogène via la caractéristique de comportement courant/tension. Les pertes ohmiques augmentent avec un courant croissant, ce qui fait chuter l'efficacité de l'électrolyse de 66% pour un courant minimal de 45 A à 60% pour un courant maximal de 130 A. Ceci correspond à une production minimale d'hydrogène de 0.32 m3n/h, respectivement maximale de 0.95 m3n/h.
4) Calcul de la production nette d'hydrogène par soustraction du prélèvement nécessaire à la régénération du sécheur. Ce prélèvement correspond à environ 8% de la production brute.

A ce calcul de production doit être ajouté un calcul de l'électricité auxiliaire en provenance du réseau:

5) Pour la régulation du transformateur DC/DC une consommation permanente de 30 W.
7) Pour la régulation de l'électrolyseur une consommation permanente de 22 W.
8) Pour le chauffage/maintient en température des bottes du sécheur (régénération): 200 W en phase de montée en température, 60 W en phase de maintient de la température de consigne. La montée en température ayant une durée de 45 minutes on peut, en pas de temps horaire, considérer une puissance moyenne de 165 W à chaque enclenchement de l'électrolyseur, de 60 W en phase de production continue.
9) Pour la compression, à un maximal de 30 bar toléré par le stock d'hydrures métalliques. Celle-ci exige 0.76 MJ électriques par m3n de production nette d'hydrogène.

L'accord entre cette méthode de calcul et les mesures en continu par pas de 5 minutes sur trois jours de production est excellente. L'écart entre valeurs mesurées et calculées, cumulées sur trois jours, est inférieur au pour-cent pour chacun des sous-systèmes. Seule la mesure du débit net est manifestement trop élevée (5% d'écart), ce qui peut s'expliquer par l'imprécision des sondes de mesures y respectives (cf. annexe 2). La relation reste excellente en comportement instantané,

erster Annäherung fällt dieser Wirkungsgrad um 0.28% pro 100 W/m2 Sonneneinstrahlung im Sommer und in der Zwischensaison, respektive um 0.23% im Winter. Eine genauere Berechnung ist mit dem Program Pvsyst möglich [4].

2) Berechnung der Ausgangsleistung des Spannungswandlers über seinen mittleren Wirkungsgrad von 96%. Diese Leistung wird nur an den Elektrolyseur abgegeben, wenn die Photovoltaikleistung über dem Sollwert von 1400 W bei eingeschaltetem, respektive 1800 W bei ausgeschaltetem Elektrolyseur ist (Hysteresis welche kurzfristige Ein/auschaltzyklen auf Grund veränderlichen Wetters unterdrückt).
3) Berechnung der Bruttowasserstoffproduktion mittels der Leistungscharakteristik des Elektrolyseurs. Die ohmschen Verluste erhöhen sich mit steigendem Strom, was den Wirkungs-grad von 66% mit minimalem Eingangsstrom von 45 A auf 60% mit maximalem Eingangsstrom von 130 A absinken lässt. Dies entspricht einer minimalen Wasserstoffproduktion von 0.32 m3n/Std, beziehungsweise 0.95 m3n/Std bei maximaler Leistung.
4) Berechnung der Nettowasserstoffproduktion durch Abzug des für die Reinigung und Trocknung nötigen Wasserstoffs. Dieser Abzug entspricht etwa 8% der Bruttoproduktion.

Im weiteren muss die Zusatzelektrizität, die vom Netz bezogen wird, berechnet werden:

5) 30W permanent für die Steuerung des Spannungswandlers.
7) 22 W permanent für die Steuerung des Elektrolyseurs.
8) Die Trocknung- und Reinigungsanlage hat folgenden Leistungsbedarf: 200 W während der 45 minütigen Aufheizphase, 60 W während der Betriebsphase. Für einstündige Zeitintervalle wird also mit 165 W Durchschnittsleistung beim Einschalten und mit 60 W für kontinuierlichen Betrieb gerechnet.
9) Die Kompression auf die für den Metallhydridspeicher maximal zulässigen 30 bar benötigt 0.76 MJ elektrische Energie pro m3n.

Die Übereinstimmung dieser Berechnungs-methode mit den Messungen im 5 Minutentakt über drei Tage ist sehr gut. Die Abweichungen von Berechnung zu Messung der kumulierten Werte betragen für jedes Untersystem weniger als 1%. Einzig bei der Nettowasserstoffproduktion ergibt die Messung einen deutlich zu hohen Wert (5% Abweichung), was durch die Ungenauigkeit der dazu benutzten Messinstrumente erklärt werden kann (siehe Anhang 2). Auch für die

ainsi qu'en atteste la figure 14, malgré les fluctuations importantes du comportement du transformateur DC/DC (photovoltaïque net) et du sécheur (hydrogène net). La première s'avère être en corrélation avec les fluctuations du photovoltaïque brut et s'explique donc par le caractère variable de l'ensoleillement (cf. annexe 3). La deuxième s'explique par le type de mesure du débit d'hydrogène net (mesure par différentielle), ne permettant une bonne interprétation que sur des durée plus longue que le pas de temps de cinq minutes.

Momentanwerte ist die Übereinstimmung zwischen Messwerten und berechneten Werten sehr gut (siehe Figur 14), ausser für den Spannungswand-ler (Nettophotovoltaikproduktion) und den Trockner (Nettowasserstoffproduktion), welche etwas grössere Schwankungen aufzeigen. Die Schwankungen des Spannungswandlers korellieren gut mit den Schwankungen der Bruttophotovoltaikproduktion und sind deshalb mit dem wechselhaften Wetter zu erklären (siehe Anhang 3). Die Schwankungen beim Trockner lassen sich mit der Messung des Wasserstofffflusses auf Grund der Druckdifferenz erklären. Diese Methode ergibt nur für lange Zeitintervalle genaue Werte.

Hypothèses implicites:
Remarquons enfin qu'à la base de cette méthode de calcul se trouve l'hypothèse implicite que le stock d'hydrures métalliques ne soit pas saturé. Nous verrons plus loin que dans la configuration actuelle ce point peut poser problème.

Grundannahmen:
Die soeben geschilderte Berechnungsmethode basiert auf der Annahme, dass der Metallhydridspeicher nicht gesätigt ist. Wir werden sehen, dass dies in der aktuellen Konfiguration nicht problemlos ist.

Lors d'un calcul de potentiel annuel on exclu également tout incident technique mettant la production hors service.

Ausserdem werden für die Berechnung des jährlichen Produktionspotentials Ausfälle der Anlage auf Grund von technischen Problemen nicht berücksichtigt.

Bilan potentiel annuel
Sur la base des données horaires d'une année type de la station météorologique de Bern-Liebefeld (cf. annexe 2), nous pouvons maintenant procéder au calcul du potentiel de production annuelle d'hydrogène solaire de l'installation Friedli. Le détail de ce bilan est donné dans la figure 15.

Jährliches Produktionspotential
Basierend auf den stündlich erhobenen Daten der Wetterstation Bern-Liebefeld (siehe Anhang 2), kann nun das Wasserstoffproduktionspotential eines typischen Jahres für die Anlage Friedli berechnet werden. Die Details dieser Bilanz können der Figur 15 entnommen werden.

A partir des quelques 293 GJ d'énergie incidente sur plan capteur, on peut ainsi s'attendre à une production photovoltaïque de 24.5 GJ (efficacité de captage globale de 8.4%). Des 23.5 GJ restant à la sortie du transformateur DC/DC seuls 18.6 GJ seront suffisamment puissants pour produire de l'hydrogène, à raison de 1150 m3n (11.5 GJ, soit une efficacité moyenne d'électrolyse de 62%). Le prélèvement nécessaire à la régénération du sécheur amène finalement la production nette à 1060 m3n (10.6 GJ, soit l'équivalent énergétique de quelques 300 litres de mazout).

Auf Grund der 293 GJ Sonneneinstrahlung auf die Sollarzellenfläche kann eine Photovoltaikproduktion von 24.5 GJ erwartet werden (globaler Wirkungsgrad von 8.4%). Von den vom Spannungswandler abgegebenen 23.5 GJ sind nur 18.6 GJ für die Elektrolyse verwendbar, was eine Wasserstoffproduktion von 1150 m3n ergibt. Dabei beträgt der durchschnittliche Wirkungsgrad des Elektrolyseurs 62%). Durch den Verbrauch der reinigungs- und Trocknungsanlage vermindert sich die Nettoproduktion auf 1060 m3n, was 10.6 GJ oder etwa 300 Liter Heizöl entspricht.

Cette production donnerait une autonomie annuelle de 4200 km au véhicule (qui l'utilise en l'occurrence dans un moteur thermique), selon un relevé de consommation de 25 m3n/100km (8 litres/100km en équivalent d'essence) fait par Friedli lui-même [3].

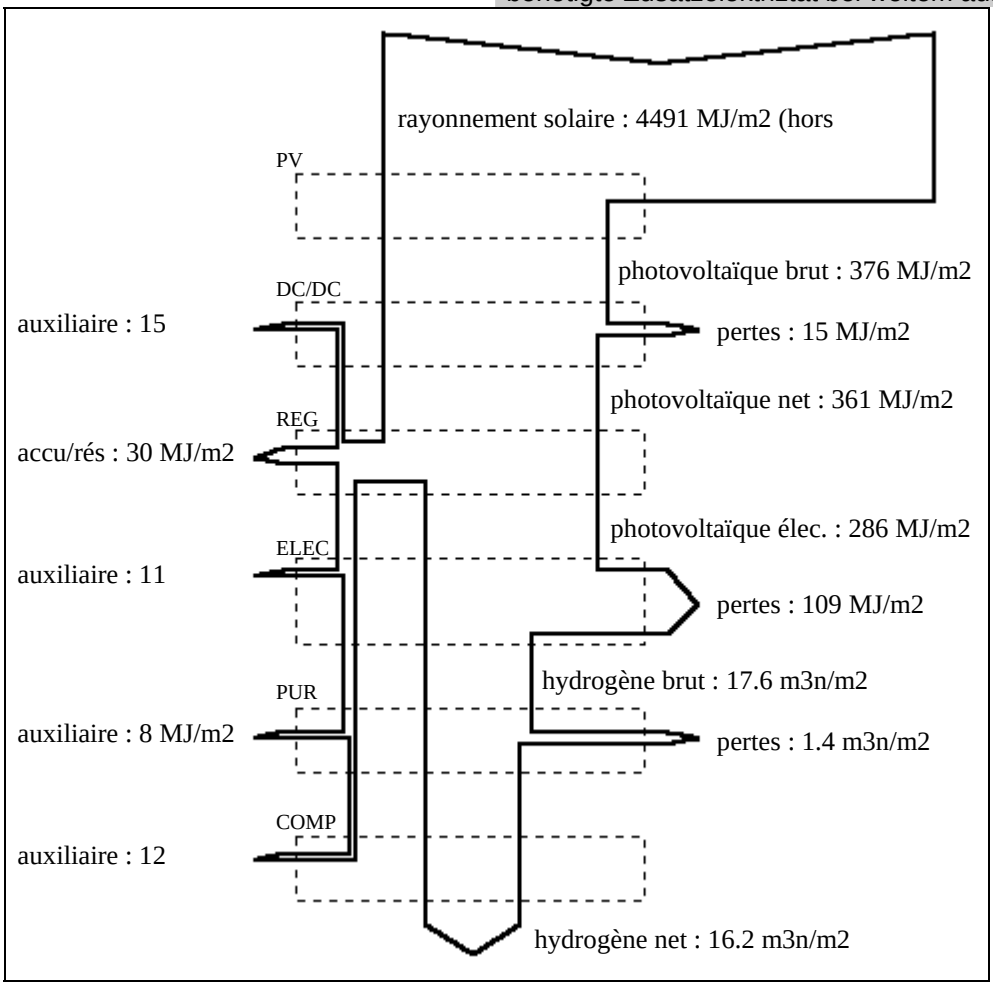
Gemäss von Friedli durchgeführten Verbrauchsmessungen (25 m3n Wasserstoff oder 8 Liter Benzin auf 100 km) würde diese Produktion eine jährliche Fahrleistung von 4200 km ergeben [3].

L'efficacité globale du stockage solaire (production nette d'hydrogène par rapport à l'énergie incidente) est ainsi de 3.6%. Cette valeur est de l'ordre de 30 à 100 fois plus grande que l'efficacité de stockage de la photosynthèse {1}.

Der totale Wirkungsgrad der Sonnenenergiespeicherung (Energiegehalt der Nettowasserstoffproduktion im Verhältniss zur Sonneneinstrahlung) beträgt 3.6%. Dieser Wert kann mit dem Speicherwirkungsgrad der Photosynthese verglichen erden, welcher etwa 30 bis 100 Mal kleiner ist {1}.

Les 4.9 GJ d'électricité photovoltaïque inutilisable pour l'électrolyse (courant trop faible) peuvent être stockés dans les accumulateurs ou injectés dans le réseau, compensant largement les 3 GJ d'électricité auxiliaire retiré de ce dernier.

Die 4.9 GJ elektrische Energie welche für die Elektolyse nicht verwendet werden können (zu geringer Strom), können in den Akkumulatoren gespeichert oder ans Netz abgegeben werden und gleichen damit die für die Produktion benötigte Zusatzelektriztät bei weitem aus.



		énergie		volume d'hydrogène	
		GJ/an	MJ/m2/an	m3n/an	m3n/m2/an
stockage solaire:					
rayonnement solaire		**292.7**	**4491**	**29134**	**447.1**
photovoltaïque brut		**24.5**	**393**	**2546**	**39.1**
photovoltaïque net	électrolyse	18.6	286	1854	28.4
	aux/accu/rés	4.9	75	489	7.5
	total	**23.5**	**361**	**2343**	**35.9**
hydrogène brut		**11.5**	**177**	**1148**	**17.6**
hydrogène net		**10.6**	**163**	**1056**	**16.2**
électricité auxiliaire:					
tranformateur DC/DC		0.95	15	95	1.45
électrolyseur		0.69	11	69	1.05
sécheur		0.51	8	51	0.78
compresseur		0.81	12	80	1.23
total		**3.0**	**45**	**294**	**4.5**

Figure 15: *Potentiel de production annuelle de l'installation Friedli (total et par m2 de capteurs): Rayonnement solaire sur plan capteur; Photovoltaïque brut (capteurs) et net (transformateur DC/DC); Hydrogène brut ('électrolyseur) et net (sécheur); Electricité*

auxiliaire. L'équivalence entre puissance et débit est donné via le contenu énergétique inférieur de l'hydrogène (10.05 MJ/m3n).

Figure 15: *Jährliches Wasserstoffproduktionspotential der Anlage Friedli (total und pro m2 Zellenfläche): Sonneneinstrahlung auf die geneigte Sonnenkollektorfläche; Brutto- und Nettophotovoltaikproduktion (Solarzellen, respektive Spannungswandler); Brutto- und Nettowasserstoffproduktion (Elektrolyseur, respektive Trocknungssystem); Zusatzelektrizität. Die Umrechnung zwischen elektrischer Leistung und Wasserstofffluss ergibt sich aus dem unteren Heizwert des Wasserstoffes (10.05 MJ/m3n).*

Stockage saisonnier

Dans la configuration actuelle il n'est cependant guère possible que l'installation Friedli produise la totalité de son potentiel. En effet la capacité de 15 m3n du stock d'hydrures métalliques semble largement trop faible pour les 1000 m3n de production anuelle. Rapellons à cet effet que la capacité minimale nécessaire au stockage dépend du déphasage de la production par rapport à la consommation. Ce déphasage n'est en principe pas nul, le cas contraire rendant la transformation du courant photovoltaïque en hydrogène superflue. Comme celà se voit sur la figure 16 la production potentielle d'hydrogène est évidemment fonction de la saison. Faute d'en avoir une conaissance plus précise, nous pouvons au contraire supposer la consommation du véhicule uniforme sur l'année et donnée mensuellement par le douzième de la production anuelle. Le bilan cumulé entre production et consommation détermine une courbe de stockage, dont l'amplitude correspond à la capacité minimale nécessaire du stock. Dans notre cas elle s'élèverait à quelques 214 m3n, soit plus de dix fois celle du stock actuel.

Saisonale Speicherung

Mit der heutigen Konfiguration ist die Anlage Friedli jedoch nicht im Stande ihr ganzes Potential zu produzieren, da die Kapazität des heutigen Metallhydridspeichers (15 m3n) scheinbar nicht in der Lage ist, die 1000 m3n jährliche Produktion zu absorbieren. Es muss erinnert werden, dass die notwendige Kapazität zum Speichern der Produktion von deren Phasenverschiebung zum Verbrauch abhängt. Wie dies in Figur 16 sichtbar ist, ist die potentielle Wasserstoffproduktion natürlich Funktion der Jahreszeit. In Abwesenheit von genaueren Kentnissen kann im Gegenteil angenommen werden, dass der Verbrauch des Fahrzeuges uniform auf das ganze Jahr verteilt ist, also monatlich als Zwölftel der gesamten Jahresproduktion gegeben ist. Die kumulierte Bilanz von Produktion und Verbrauch ergibt somit eine Speicherkurve, dessen Ausdehnung die minimale Speicherkapazität bestimmt. In unserem Fall steht diese bei 214 m3n, also mehr als das zehnfache derjenigen des heutigen Speichers.

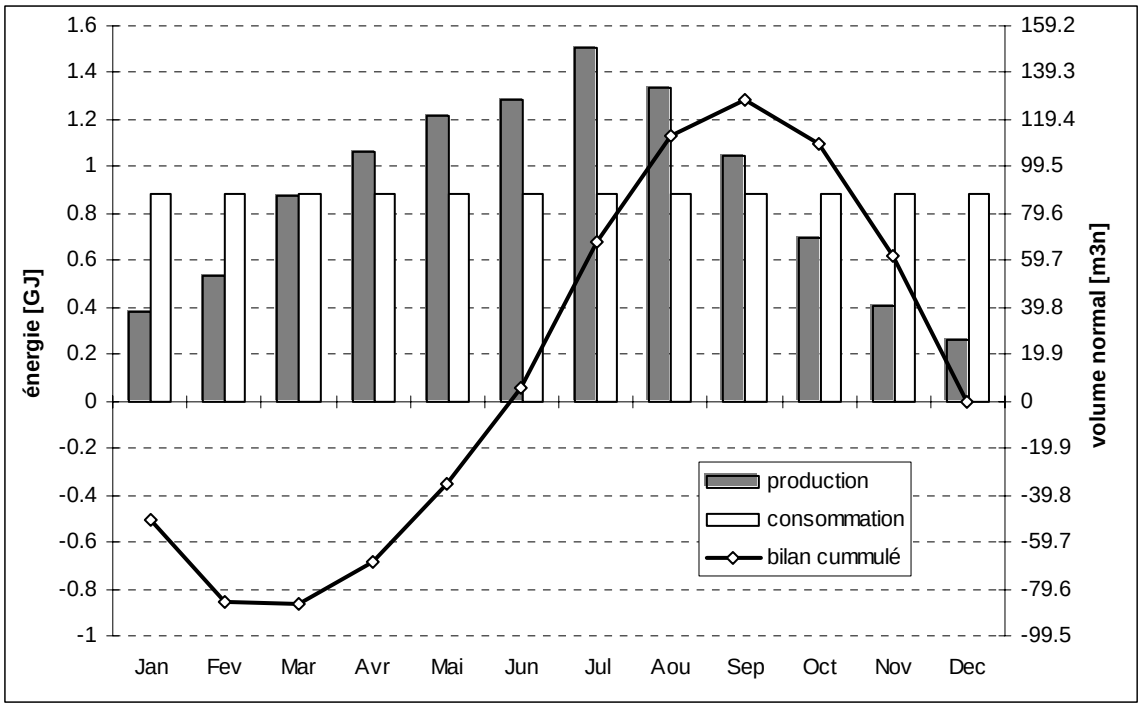


Figure 16: *Détermination de la capacité de stockage minimale pour une consommation supposée uniformément répartie sur l'année: Production et consommation mensuelles ainsi que bilan cumulé.*

Figure 16: *Bestimmung der minimalen Speicherkapazität für einen angenommenen übers Jahr uniformen Verbrauch: Monatliche Produktion und Verbrauch sowie kumulierte Bilanz.*

Pour se faire une idée approximative de la taille et du poids d'un réservoir pouvant stocker cette quantité d'hydrogène (ou son équivalent énergétique) nous reprendrons ici simplement les données du stock d'hydrures métalliques actuel, des bouteilles sous pression existant sur le marché ainsi que des accumulateurs électriques utilisés dans l'installation Friedli. Par un simple calcul de proportionalité on obtient alors les tailles indicatives suivantes pour l'une ou l'autre des options:

- un stock d'hydrures métalliques à 30 bar d'une taille de 1.3 m3 pesant 3.3 tonnes.
- 21 bouteilles sous pressions de 200 bar d'une taille totale de 1.7 m3 et pesant 1.5 tonnes.
- 186 accumulateurs électriques d'une taille totale de 14 m3 et pesant 52 tonnes.

Ces chiffres mettent d'eux-même en évidence l'intérêt de l'hydrogène pour le stockage saisonier. Ceci-dit le cas défavorable des accumulateurs tel que présenté ici doit être nuancé par la remarque suivante: leur utilisation se ferait en fait directement à base du courrant photovoltaïque net (quasiment deux fois plus d'énergie que dans la production nette d'hydrogène), alors que la retransformation d'hydrogène en électricité serait tributaire d'une nouvelle perte. En estimant cette dernière à 40% le stockage en accumulateur permettrait donc en principe de stocker aux alentours de trois fois plus d'électricité que l'hydrogène, dont il conviendrait de soustraire les pertes par autodécharge.

Quoiqu'il en soit, dans les conditions actuelles de l'installation Friedli il est clair que la production d'hydrogène reste actuellement relativement marginale. Le surplus important de production photovoltaïque par rapport aux besoins domestiques est ainsi soit injectée dans le réseau, soit actuellement perdu par la non-automatisation du mode de production accumulateurs/électrolyseur/réseau. Cet état de fait pourrait cependant facilement être corrigé par un investissement en conséquence.

Optimisation de l'installation:

L'analyse fouillée de l'enchaînement des sous-systèmes et les modèles qui en découlent permettent par ailleurs d'imaginer et calculer des stratégies d'optimisation du concept.

Ainsi il ressort de ce qui précède que l'efficacité globale de la production d'hydrogène pourrait théoriquement être améliorée en stockant temporairement toute l'énergie photovoltaïque dans les accumulateurs, d'où elle pourrait être

Um eine annähernde Idee des benötigten Volumens und des Gewichtes eines solchen Speichers zu gewinnen, übernehmen wir hier einfach die Daten des heutigen Metallhydridspeichers, der im Handel erhältlichen Druckflaschen, sowie der in der Anlage Friedli verwendeten elektrischen Akkumulatoren. An Hand einer einfachen Proportion erhält man folgende Anzeigewerte für die eine oder andere Option:

- ein Metallhydridspeicher zu 30 bar mit einer Grösse von 1.3 m3 und einem Gewicht von 3.3 Tonnen.
- 21 Druckflaschen zu 200 bar mit einer Gesamtgrösse von 1.7 m3 und einem Gewicht von 1.5 Tonnen.
- 186 elektrische Akkumulatoren mit einer Gesamtgrösse von 14 m3 und einem Gewicht von 52 Tonnen.

Diese Zahlen machen den Vorteil des Wasserstoffes für saisonale Speicherung deutlich klar. Zum hier nachteilig dargestellten Fall der Akkumulatoren muss jedoch mit folgender Bemerkung begleitet werden: Ihr Einsatz würde in der Tat direkt für den Nettophotovoltaikstrom stattfinden (also fast doppelt so viele Energie wie in der Nettowasserstoffproduktion enthalten) und die Wiedergewinnung von Elektrizität ab Wasserstoff würde nochmals einen Verlust mit sich bringen. Wenn dieser um die 40% abgeschätzt wird, so könnte die Elektrizitätspeicherung im Prinzip dreimal so hoch sein wie im Wasserstoff, wovon jedoch die Verluste durch Selbstentladung abgeziehen werden sollten.

Wie auch immer steht im Momet klar, dass in der Friedli Anlage im Moment Wasserstoff erst als Randproduktion betrieben werden kann. Der wichtige im Haushalt nicht verwendete Photovoltaiküberschuss wird heutzutage entweder ins öffentliche Netz gespiesen, oder aber geht wegen der nicht automatisierten Betriebsart (Akkumulatoren/Elektrolyseur/Netz) verloren. Dieser Zustand könnte dank entprechenden Investitionen leicht korigiert werden.

Optimierung der Anlage:

Die detaillierte Analyse der Untersystehme und der daraus resultierenden Modelle ermöglicht es gewisse Optimierungsmöglichkeiten zu erkennen und zu berechnen.

Aus dem Vorangegangenen ist zum Beispiel ersichtlich, dass der globale Wirkungsgrad der Wasserstoffproduktion theoretisch erhöht werden könnte, indem der ganze Photovoltaikstrom zuerst in den Akkumulatoren gespeichert würde, um

retirée au fur et à mesure à la puissance d'électrolyse minimale. Ceci permettrait d'utiliser l'électrolyseur à son point de rendement maximal ainsi que de prendre parti des faibles ensoleillements et de s'affranchir ainsi de l'effet seuil actuel. Un calcul effectué dans ce sens (en tenant compte d'un rendement des accumulateurs de 95%) montre que la production d'hydrogène pourrait ainsi être augmenté de 22%. Cette option ne produirait cependant plus d'électricité permettant de couvrir les besoins en électricité auxiliaire, qui augmenteraient quelque peu vu l'utilisation plus conséquente de l'électrolyseur et du système de purification. Une stratégie mixte couvrant exactement les besoins en énergie ramèneraient le gain de production à uniquement 6%. En ce sens il peut être affirmé que le système à utilisation multiple de la production photovoltaïque tel qu'il existe sur l'installation Friedli est quasiment optimum, même dans l'optique d'une production d'hydrogène prioritaire. Reste réservée la nécessité d'avoir à cet effet une régulation automatique des divers modes de production - ce qui n'est actuellement pas le cas ainsi que le montre clairement l'expérience du 27 juillet 1996 (cf. annexe 3).

Il ressort également clairement de l'analyse que dans l'état actuel et sans utiliser le circuit de thermalisation, la capacité de stockage est nettement trop faible et relativement lente à gérée. Une optimisation de ce concept ou le passage à un stockage sous pression semble donc de première importance dans l'optique d'une réelle priorité mise sur la production d'hydrogène.

Quoi qu'il en soit cette étude a permis de mettre en place un ensemble d'outils pouvant servir dans le futur au dimensionnement et à l'optimisation de telles installations.

dann den Elektrolyseur unabhängig von der momentanen Sonneneinstrahlung mit seinem maximalen Wirkungsgrad betreiben zu können. Dies würde im weiteren erlauben, die schwache Strahlung benützen zu können. Eine Berechnung in diesem Sinne ergibt mit einem Akkumulatorwirkungsgrad von 95% eine Steigerung der Wasserstoffproduktion um 22%. Diese Option würde allerdings keinen Strom mehr ans Netz abgeben und damit den Bedarf an Zusatzstrom, welcher wegen der Mehrproduktion ansteigt, nicht mehr ausgleichen. Bei einer Variante, welche genau soviel Strom ans Netz abgibt, wie für die Produktion nötig ist, würde die Wasserstoffproduktionssteigerung nur noch 6% betragen. Dies zeigt, dass die Anlage Friedli mit ihren verschiedenen Verwendungen des Photovoltaikstromes auch für den Fall einer prioritären Wasserstoffproduktion schon sehr Nahe am Optimum ist. Wie es das Experiment vom 27. Juli 1996 zeigt (siehe Anhang 3), müsste eine automatische Steuerung der verschiedenen Produktionsmodi als notwendig betrachtet werden.

Im weiteren zeigt sich, dass die Speicherkapazität der Anlage Friedli zurzeit für die saisonale Speicherung deutlich zu klein und durch das Nichtbenützen des Kühlkreislaufes zu träge ist. Unter dem Gesichtspunkt einer prioritären Wasserstoffproduktion wäre demnach eine Optimierung dieses Metallhydridspeichers oder ein Wechsel zu einem Drucktank ein wichtiger Punkt.

Dank dieser Untersuchung konnten auf jeden Fall eine Anzahl Erkentnisse und Simulationsprogramme gewonnen werden, welche bei der Planung von zukünftigen Anlagen sicher hilfreich sein werden.

CONCLUSIONS

Une étude systématique et relativement fouillée de chacun des composants de la chaîne de production/stockage d'hydrogène de l'installation Friedli a permis d'en acquérir une très bonne compréhension. Il en a été extrait un modèle de calcul et représentation graphique simple qui permet l'évaluation à toute heure de la production d'hydrogène. Construit à partir de mesure de caractéristiques individuelles, le modèle a été validé avec une série de mesure de production en continu.

Ceci a permis d'établir le potentiel annuel de production, dans l'hypothèse d'une utilisation de l'énergie photovoltaïque prioritairement destinée à la production d'hydrogène (ce qui n'est pas le cas dans la configuration actuelle, l'énergie photovoltaïque servant également à subvenir aux besoins domestique d'électricité). Cette production pourrait ainsi s'élever à un total de quasiment 11 GJ/an (1100 m3n/an), soit par unité de surface de capteur à 160 MJ/m2/an (16 m3n/m2/an). Ce taux de stockage du flux solaire est environ 30 à 100 fois supérieur à celui de la photosynthèse. Un avantage supplémentaire de l'hydrogène est de pouvoir être brûlé quasiment sans émanation polluante, voir d'être retransformé en électricité via une pile à combustible.

Deux options fondamentales semblent se dessiner à la question des améliorations ou extensions possibles de l'installation Friedli:

Dans la première option la consommation d'électricité domestique continue de se baser sur le stockage de l'électricité photovoltaïque en accumulateur, suite à quoi la production d'hydrogène reste la priorité secondaire qu'elle est aujourd'hui. Dans ce cas l'installation, qui a déjà bénéficié d'un important travail d'optimisation et d'intégration des sous-systèmes entre eux, mériterait deux investissement supplémentaires pour la rendre complètement fonctionnelle au quotidien. Tout d'abord la sélection manuelle des modes d'utilisation de l'énergie photovoltaïque (accumulateur, hydrogène, réseau) devrait être automatisée. Ensuite il serait nécessaire que le circuit de thermalisation du stock soit utilisé, afin d'exploiter à son mieux sa capacité de stockage.

Une deuxième option, envisagée par M. Friedli, serait de destiner toute la production photovoltaïque à la production d'hydrogène. A cet effet le stock devrait être agrandi d'un facteur 10 ou substitué. Les besoins électriques de la maison seraient alors couverts par une pile à combustible. Ainsi le potentiel de stockage saisonnier de l'hydrogène serait réellement exploité. Il reste à vérifier si cette solution

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Eine systematische und sorgfältige Untersuchung der Komponenten der Wasserstoffproduktions- und Speicherkette der Anlage Friedli erlaubte ein sehr gutes Verständniss der verschiedenen Abläufe und Zusammenhänge. Daraus wurde ein Input/Output-Modell mit graphischer Darstellung zur Berechnung der Wasserstoffproduktion zu einem beliebigen Zeitpunkt erstellt. Das Modell basiert auf der Messung der Charakteristik der individuellen Komponenten und wurde durch kontinuierliche Messung der Anlage überprüft.

Dies erlaubte die Berechnung des jährlichen Produktionspotentials, unter der Annahme einer prioritären Wasserstoffproduktion (was in der aktuellen Konfiguration nicht der Fall ist, da die Photovoltaik auch den Strombedarf des Haushaltes deckt). Die Wasserstoffproduktion könnte maximal 11 GJ (1100 m3n) pro Jahr betragen. Dies entspricht 160 MJ/m2 (16 m3n/m2) pro Jahr. Damit ist der Speicherwirkungsgrad der anfallenden Sonnenenergie 30 bis 100 Mal höher als im Fall der Photosynthese. Zusätzlicher Vorteil von Wasserstoff ist die annähernd abgasfreie Verbrennung oder die Möglichkeit, mit Hilfe einer Brennstoff-zelle wieder Strom zu gewinnen.

Die Frage nach möglichen Verbesserungen oder Erweiterungen der Anlage Friedli führt zu zwei verschiedenen Ansätzen:

In ersten Fall wird der Strombedarf des Haushaltes weiterhin mit Photovoltaik und Akku-speicherung gedeckt und die Wasserstoffproduktion bleibt weiterhin zweitrangig. Um ihre Alltagstauglichkeit zu erhöhen müsste in diesem Fall die schon optimierte Anlage in zwei Punkten verbessert werden. Als erstes müsste die manuelle Betriebswahl (Akkumulator, Wasserstoff, Netz) automatisiert werden. Zweitens müsste der Kühlkreislauf des Metallhydridspeichers verwendet werden, womit die maximale Speicherkapazität ausgenützt werden könnte.

Eine zweite Möglichkeit, welche von Herrn Friedli schon in Betracht gezogen wurde, wäre eine Umstellung der Anlage auf ausschliessliche Wasserstoffproduktion. Der Wasserstoffspeicher müs-ste dann um ein 10faches vergrössert oder umgedenkt werden und der Strombedarf des Haushaltes mittels einer Brennstoffzelle gedeckt werden. Dadurch würde das Potential des Wasserstoffes zur saisonalen Speicherung von Sonnenenergie wircklich ausgenützt. Es bleibt jedoch abzuklären, ob dies eine Verbesserung der Sonnenenergienützung mit sich bringen würde, da ja zur Zeit der Strombedarf des Haushaltes problemlos trotz Selbstentladung

ammènerait réellement une amélioration de l'utilisation de l'énergie solaire, puisque même en hiver les besoins domestiques sont actuellement couverts sans problème par les accumulateurs, malgré leur autodécharge. La possibilité d'un stockage saisonnier de l'électricité ouvrirait cependant certainement des perspectives pour l'exploitation du véhicule à hydrogène.

La mise sur pied par Monsieur Friedli de son installation démontre qu'il est actuellement déjà possible d'utiliser la technologie de l'hydrogène pour le stockage d'électricité photovoltaïque et ceci hors du domaine de la recherche. Cette étude a permis d'acquérir une vision synthétique et globale de l'instalation en question, ainsi que de mettre à la disposition des personnes intéressées des outils d'évaluation et prospection dans le domaine.

auch im Winter mittels Akkumulatoren gedeckt werden kann. Die mögliche saisonale Elektrizitätspeicherung in Wasserstoff würde jedoch bestimmt für den Betrieb des Wasserstofffahrzeuges interessante Perspektiven eröffnen.

Herrn Friedlis Aufbau einer Solarwasserstoffanlage zeigt, dass es heutzutags schon möglich ist die Wasserstofftechnologie für die Speicherung von photovoltaischem Strom einzusetzen und dies ausserhalb des Forschungsbereichs. Diese Untersuchung ermöglichte es, ein synthetisches Bild der Anlage zu gewinnen, sowie Interessierten Abschätzungs- und Forschungswerkzeuge anzubieten.

REMERCIEMENTS

Cette étude n'a été possible que grâce à la participation d'un grand nombre de personnes. Qu'ils soient ici tous cordialement remerciés:

- Monsieur et Madame Markus et Vreni FRIEDLI qui m'ont laissé tout loisir de prendre connaissance de leur installation, au risque des incidents techniques que représente une personne décidée à y comprendre quelque chose, et qui m'ont généreusement accueilli dans leur foyer.
- Monsieur Maurice MAESS, de VCST Hydrogen System, qui a eu l'amabilité et la patience de répondre en détail à toute mes questions concernant le fonctionnement de l'électrolyseur et de la régulation de l'installation.
- Messieurs Dr. Bernard LACHAL et Prof. Klaus YVON, de l'Université de Genève, pour les discussions critiques et les conseils et la relecture du rapport.
- Messieurs Eric PAMPALONI et Jean-Luc LORENZONI, de l'Université de Genève, pour leur aide précieuse dans la mise en place du système de mesure.
- Monsieur Martin AEMMER, ancien étudiant de l'Ecole d'Ingénieur de Bienne, pour m'avoir transmis les mesures qu'il avait faite sur l'installation lors du développement du transformateur DC/DC, ainsi que pour sa disponibilité lors de la mise en place des mesures du dit appareil.
- Monsieur Dr. Jean Marc JOUBERT, de l'Université de Genève, pour avoir pris en charges les mesures et l'analyse du stock d'hydrures métalliques.
- Monsieur Dr. André MERMOUD, de l'Université de Genève, pour ses explications concernant les champs photovoltaïques et l'utilisation du logiciel Pvsyst.
- Madame Dr. Myriam GARBELY, de l'Université de Genève, et Monsieur Stefan HUNZIKER, diplômant à l'Université de Genève, pour avoir activement contribué à la traduction en allemand.

DANKSAGUNGEN

Diese Studie war nur dank der Teilnahme einer grossen Anzahl Leute möglich. Ihnen alle sei hier herzlich gedankt:

- Herrn und Frau Markus und Vreni FRIEDLI, die mir den genügenden Spielraum gegeben haben, ihre Anlage kennen zu lernen, die das damit verbundene Risiko in Kauf genommen haben und die mich grossmütig in ihr Haus aufgenommen haben.
- Herrn Maurice MAESS, von VCST Hydrogen System, welcher so freundlich und geduldig war, meine Fragen bezüglich der Anlage und des Steuerungssystems zu beantworten.
- Herrn Dr. Bernard LACHAL und Herrn Prof. Klaus YVON, von der Universität Genf, für die kritischen Diskussionen, die Ratschläge und das Durchlesen des Berichts.
- Herrn Eric PAMPALONI und Herrn Jean-Luc LORENZONI, von der Universität Genf, für die wertvolle Hilfe beim Aufstellen der Messungen.
- Herrn Martin AEMMER, ehemaliger Student der Ingenieurschule Biel, welcher mir die zur Zeit des Herstellung des Spannungswandlers durchgeführene Messungen übergeben hat und zum Aufbereiten der Messungen desselben Apparates mitgeholfen hat.
- Herrn Dr. Jean Marc JOUBERT, von der Universität Genf, welcher die Messungen des Metallhydridspeichers durchgeführt hat.
- Herrn Dr. André MERMOUD, von der Universität Genf, für seine Erklärungen betreffend die Photovoltaikzellen und den Umgang mit dem Pvsyst-Programm.
- Frau Dr. Myriam GARBELY, von der Universität Genf, und Herrn Stefan HUNZIKER, Diplomstudent an der Universität Genf, für die aktive Teilnahme an der deutschen Übersetzung.

ANNEXE 1: SYSTEME DE MESURES

Type de mesures:
L'étude et la mesure du système se sont déroulées en deux phases. Lors de la première, au cours de laquelle un important travail de restructuration du système de régulation électronique de l'électrolyseur et des composants avals prenait fin et empêchait ainsi provisoirement le fonctionnement complet de l'installation, nous nous sommes concentrés sur des mesures de caractérisation, essentiellement électriques, des sous-systèmes. Nous avons également étudié une série de mesures faites par Monsieur Aemmer, de l'Ecole d'Ingénieur de Bienne, lors du développement du régulateur/transformateur DC/DC [1],que nous avons en partie analysées sous des formes complémentaires à celle, essentiellement chronologique, entreprise dans le cadre du rapport en question. Nous aimerions ici insisté sur le fait que ces dernières mesures, généreusement mises à notre disposition par Aemmer, ont été menées avec des dans le seul but de vérifier le bon fonctionnement de l'appareil qu'il avait développé. Les quelques inconsistances de ces mesures, que nous relevons dans l'étude des sous-systèmes, ne doivent donc pas remettre en question la qualité du travail en question.

Lors de la deuxième phase nous avons procédé à une série de mesures en continu de toute l'installation, permettant de vérifier tant les caractéristiques des sous-systèmes, que la méthode de calcul du bilan potentiel annuel qui en dérive. Nous insistons ici sur les moyens relativement restreint dont nous avons bénéficié, qui rendait impossible une mise en oeuvre et une précision des mesures du niveau qu'aurait eue une campagne automatisée et à long terme.

Liste des sondes:
Au vu de la remarque précédente, nous nous sommes limités dans cette étude à compléter l'échantillon relativement complet de sondes de mesure déjà intégrées dans la régulation par les principales sondes manquantes à l'étude du système. Les mesures du système de sondes existant sur place pour la régulation (dénotées plus bas de l'acronyme REGUL) ont été reprise directement sur un PC via le programme de visualisation de l'installation, alors que nos propres mesures (dénotées de l'acronyme UNIGE) ont été saisies par l'intermédiaire d'un datalogger. Dans l'ordre donné par l'enchaînement des sous-systèmes, les grandeurs mesurées sont les suivantes:

météo:

Gsol (UNIGE) : Rayonnement solaire global dans le plan des capteurs photovoltaïques, solarimètre.
Tamb (REGUL) : Température ambiante. Il s'agit là en fait d'une mesure de la température du local de production d'hydrogène qui, situé en dehors de la maison à proprement parler, s'avère être plus ou moins corrélé à l'ensoleillement. A défaut d'une réelle mesure de température extérieure, nous avons utilisé cette grandeur pour la simulation du champs photovoltaïque.

champs photovoltaïque:

UPv (UNIGE) : Tension photovoltaïque à l'entrée du transformateur DC/DC, mesure galvaniquement isolée.
IPv (UNIGE) : Courant photovoltaïque à l'entrée du transformateur DC/DC, pince ampèremétrique.

électrolyseur:

UElec (REGUL) : Tension d'électrolyse. Pour les mesures en continu cette grandeur a été saisie en valeurs instantanées ainsi que moyennées sur le pas de temps d'acquisition de 5 minutes.
IElec (REGUL) : Courant d'électrolyse. Même remarque que pour UElec.
TElec (REGUL) : Température d'électrolyse.
PrElec (REGUL) : Pression dans l'électrolyseur.
StEauF (REGUL) : Temps d'ouverture cumulé de la vanne de refroidissement du bloc d'électrolyse.
StEauG (REGUL) : Temps d'ouverture cumulé de la vanne de refroidissement des gaz d'hydrogène et oxygène.
StEauE (REGUL) : Temps d'ouverture cumulé de la vanne d'apport d'eau au bloc d'électrolyse.

EauH (REGUL) : Niveau d'eau dans la botte d'hydrogène.
EauO (REGUL) : Niveau d'eau dans la botte d'oxygène.

purificateur/sécheur:

Tpur (REGUL) : Température du condensateur.
TSecA (REGUL) : Température de la botte A du sécheur .
TSecB (REGUL) : Température de la botte B du sécheur.
StReg (REGUL) : Temps d'ouverture de la vanne de régénération du sécheur.

ballon de stockage intermédiaire:

Tbal (UNIGE) : Température du ballon, thermocouple. Il s'agit là d'une mesure faite sur l'enceinte du ballon, avec isolation thermique vers l'extérieur.
PrBal (REGUL) : Pression dans le ballon.
DebitBal (UNIGE) : Débit d'hydrogène entrant dans le ballon. Il s'agit là d'une mesure indirecte, faite à partir de la différentielle de pression donnée par PrBal, le volume du ballon (étalonné par nos soins) et la relation entre accroissement molaire et accroissement en pression donné par les gaz parfaits {7}. Une mesure directe de ce débit ainsi que du débit à la sortie de l'électrolyseur (pertes intermédiaires dans le sécheur!) a du être abandonnée pour cause de variations temporelles trop rapides pour les débitmètres habituels. Le système de régulation maintient en effet la légère surpression entre électrolyseur et ballon de stockage par ouvertures/fermetures rapprochées (de l'ordre de la seconde) d'une vanne. L'un des deux débitmètres ainsi prévus a finalement été installé à la sortie du stock d'hydrures métalliques (cf. DebitOut, plus bas), pour lire le débit de soutirage.

compresseur:

Pcomp (UNIGE) : Puissance compresseur, puissancemètre. Pour les mesures en continu cette grandeur correspond à la valeur moyenne sur le pas de temps d'acquisition de 5 minutes et est donc inférieure, vu le temps de compression d'environ 150 s secondes, à la puissance réelle du compresseur. L'énergie de compression se calcule via le temps de compression StComp.
StComp (REGUL) : Temps de compression.
TCompOut (UNIGE) : Température tuyau sortie compresseur, thermocouple. Cette mesure, thermiquement isolée de l'extérieur, rend essentiellement compte de la conduction de chaleur en provenance du compresseur, et non de l'échauffement de l'hydrogène par compression.
TCompIn (UNIGE) : Température tuyau entrée compresseur, thermocouple. Même remarque que pour TCompOut.

stock d'hydrures métalliques:

THyd (UNIGE) : Température stock, thermocouple. La sonde, isolée thermiquement de l'extérieur, est plaquée sur l'enceinte du stock. Vu que celle-ci est séparée des hydrures par une cavité destinée à l'apport/retrait de chaleur (mais vide en l'occurrence), cette mesure ne donne qu'une idée approximative du comportement thermique du stock.
THydIn (UNIGE) : Température tuyau entrée stock, thermocouple. Mesure thermiquement isolée de l'extérieur.
DebOut (UNIGE) : Débit de soutirage du stock, débitmètre.

Précision des sondes:
L'utilisation des mesures en provenance de la régulation comporte l'inconvénient de ne pas avoir permis leur calibration, dont nous pouvons cependant estimer l'erreur à 2% pour les mesures de pression, courant et tension, à 1°C pour les mesures de températures. Nous avons par contre étalonné les sondes les plus importantes de notre système de mesure, à savoir le solarimètre(<1%), le débitmètre(3%) et la pince ampèremétrique pour le courant photovoltaïque. Ce dernier étalonnage a mis en évidence une sous-estimation de 6% de la sonde. Un doute subsiste malheureusement quant à la pertinence pour les mesures de cet étalonnage, effectué après la phase de mesure et

pouvant également être ramené à une quelconque altération survenue entre temps. En effet, la comparaison - en terme d'efficacité du transformateur DC/DC (voir l'analyse des sous-systèmes) - de la puissance photovoltaïque déduite de cette mesure avec la puissance de l'électrolyseur déduite du courant d'électrolyse semble en parfait accord avec les mesures effectuée par l'Ecole d'ingénieurs de Bienne [1] ainsi qu'avec la réputation dont bénéficie les transformateurs DC/DC issus de leur laboratoire, et ne justifie donc pas la correction apportée par l'étalonnage. En d'autres termes, et pour revenir à l'absence d'étalonnage des mesures en provenance de la régulation, il est fort possible qu'une erreur globale de l'ordre de 5% entache les mesures, mais leur adéquation les unes aux autres semble être bien meilleure que ça, ainsi que le montre l'analyse des sous-systèmes et la comparaison aux données de fabricant.

ANNEXE 2: ETUDE DES SOUS-SYSTEMES

Gisement solaire

situation		
altitude	600 m	
azimut plan capteur	10° SSE	
inclinaison plan capt.	35°	
durée ensoleillement	4861 h	1
plan horizontal		
énergie directe	1805 MJ/m2	1
énergie diffuse	2215 MJ/m2	1
énergie totale	4020 MJ/m2	1
plan capteur (avec horizon)		
énergie directe	2263 MJ/m2	2
énergie diffuse	2228 MJ/m2	2
énergie totale	4492 MJ/m2	2

Figure 17: *Fiche récapitulative du gisement solaire. Provenance des données:*
1) Données horaires d'une année type de la station météorologique de Bern-Liebefeld;
2) Transposition avec logiciel Pvsyst et mesure de l'horizon par photo fish-eye.

Données météorologiques:
Le gisement solaire qui se trouve à la source du fonctionnement de l'installation se déduit des données horaires d'une année types de la station météorologique de Bern-Liebefeld, à quelques 25 km à vol d'oiseau de Zollbrück (altitude: 630 m, latitude: 46,9 °N, longitude: 7,75 °E), dont les valeurs se trouvent par exemple dans la base de données Météonorm [5]. Le rayonnement annuel global sur plan horizontal est de 4020 MJ/m2, dont 55% sous forme de rayonnement direct, 45% sous forme de rayonnement diffus (rayonnement réfracté par l'atmosphère et retransmis par l'ensemble de la voûte céleste).

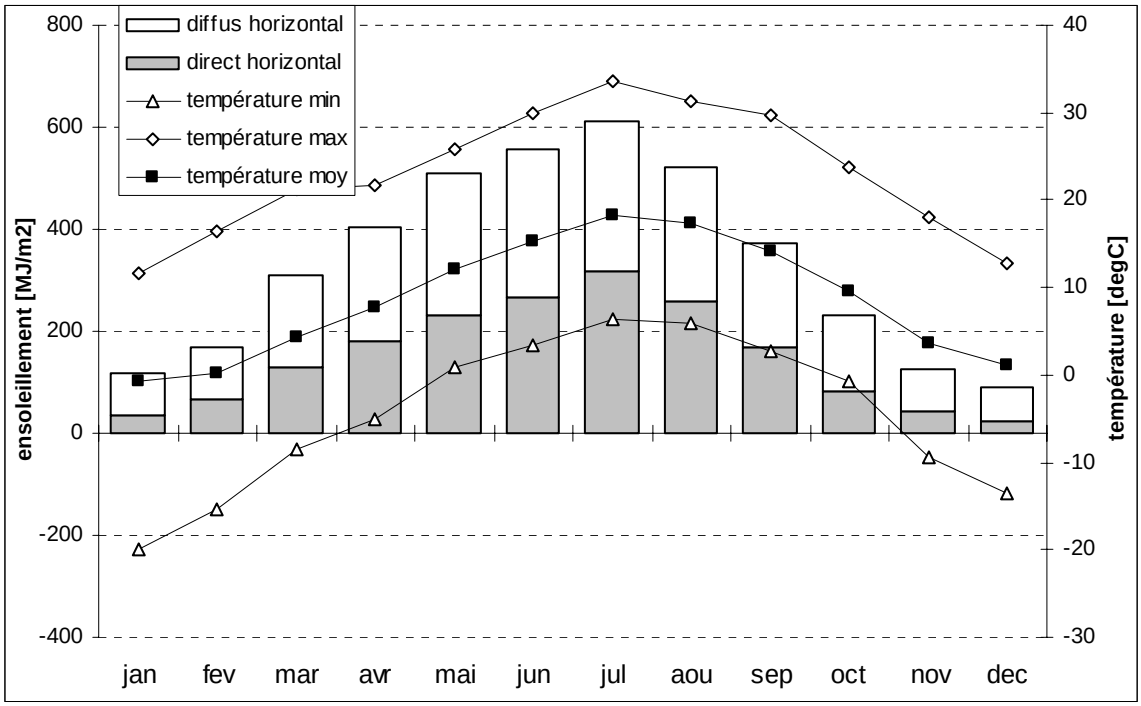


Figure 18: *Evolution mensuelle de la météo de Bern-Liebefeld pour une année standard: températures moyenne et extrêmes (en valeurs horaires), rayonnements direct et diffus.*

Plan capteur et horizon:
Dans l'application qui nous intéresse ce rayonnement est utilisé sur un toit incliné à 35° et orienté quasiment plein sud, à 10° vers l'est. Cette orientation optimale sous nos latitudes fait passer l'énergie incidente globale sur plan capteur à 4490 MJ/m2, le gains se faisant essentiellement en mi-saison,

favorisant les hautes puissances au détriment des petites (cf. figure 21). La transposition du rayonnement sur plan capteur a été effectuée avec le logiciel de simulation Pvsyst utilisé pour la simulation du champs photovoltaïque (cf. plus bas), en tenant compte de l'horizon visible depuis le toit en question. L'horizon ainsi que la course du soleil sont lisibles sur une représentation sphérique de la voûte céleste (cf. figure 20), correspondant à une photo avec objectif « oeil de poisson ». On remarque que l'installation est quasiment dégagée de toute obstruction proche (à part pour une pointe d'arbre au sud-sudouest) et que le soleil ne se voit caché qu'en début et fin de journée par les basses collines avoisinantes (cf. figure 19), occultant un rayonnement solaire alors peu énergétique.

Figure 19: *Situation géographique de l'installation (échelle 1 :50000).*

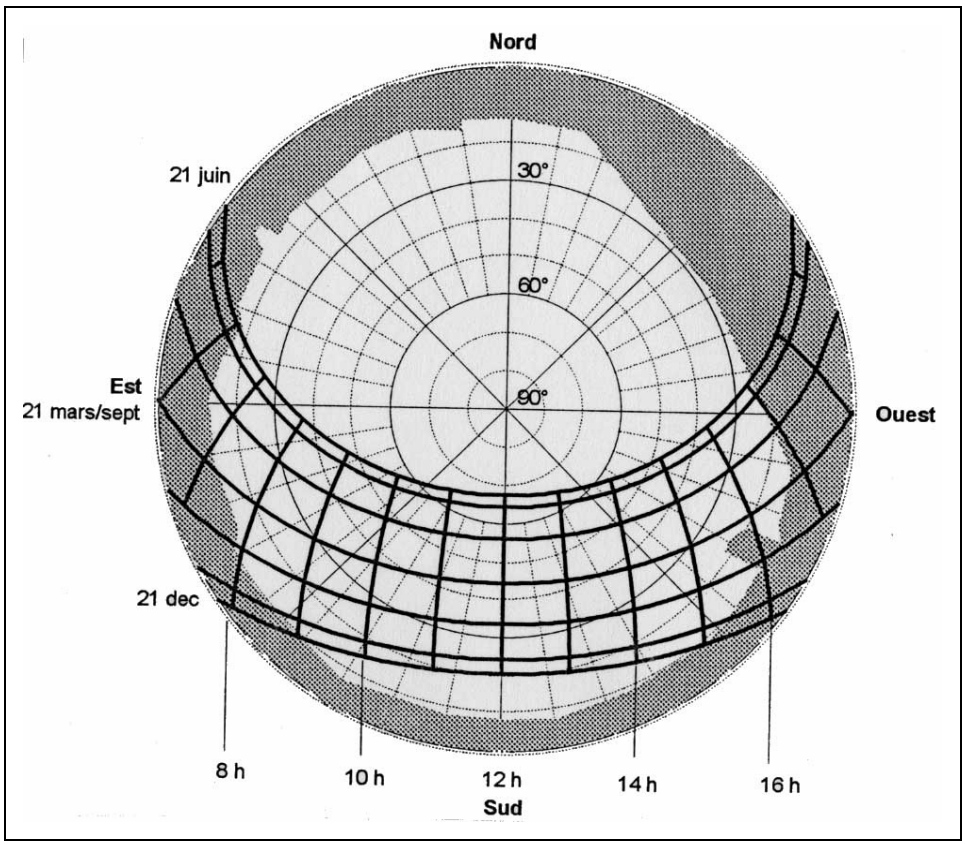


Figure 20: *Projection sphérique de la course du soleil et de l'environnement immédiat de l'installation (selon une photo fish-eye du ciel prise à la base inférieure du champs de capteur): en traits épais le trajet du soleil heure par heure et mois par mois; en traits fins la position dans le ciel (hauteur angulaire et azimut); en gris les obstructions.*

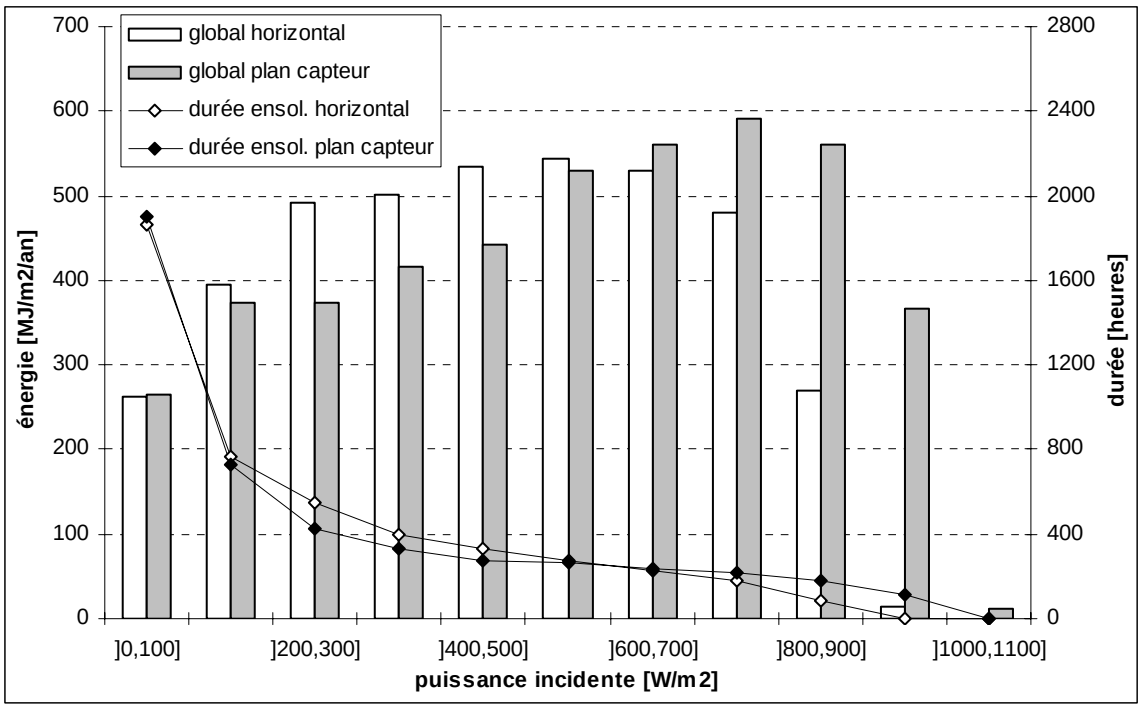


Figure 21: *Distribution par tranches de puissance incidente (sur les plans respectifs) de l'énergie incidente en valeurs horaires d'une année standard: rayonnement global et durée d'ensoleillement sur plans horizontal et capteur, obtenu par transposition des rayonnements direct et diffus et en tenant compte de l'horizon.*

Champs photovoltaïque

panneaux		
fabriquant	Siemens	
	Industriestrasse 43	
	CH - 8603 Schweizenbach	
modèle	Arcosolar M73 et M75	
nombre de cellules	33 cell/panneau	1
surface brute	4023 cm2/panneau	1
surface nette	3494 cm2/panneau	1
puissance nominale		
M73	selon fabriquant: 41 W	1
	réelle: 37.8 W	2
M75	selon fabriquant: 48 W	1
	réelle: 41.6 W	2
champs		
câblage	par série de 6, regroupement en deux modules	
module no 1	42 M73 et 48 M75	
module no 2	72 M75	
surface brute totale	65.2 m2	
puissance nominale	selon fabriquant: 7.4 kW	1
	réelle: 6.6 kW	2
efficacité de captage		
été	9.7% - 0.28% par 100W/m2 d'ensoleillement	3
mi-saison	10.1% - 0.28% par 100W/m2 d'ensoleillement	3
hiver	10.4% - 0.23% par 100W/m2 d'ensoleillement	3

Figure 22: *Fiche récapitulative du champs photovoltaïque. Provenance des données: 1) Données fabriquant; 2) Mesure de caractéristique U/I de l'Ecole dIngénieur de Bienne renormalisée à ensoleillement et température de panneaux standard (1000 W/m2, 25°C) via le logiciel Pvsyst; 3) Régression entrée/sortie sur données horaires générées avec le logiciel Pvsyst.*

Description du champs:
Le champs photovoltaïque recouvre l'essentiel du pan de toit sud de l'habitation (cf. gisement solaire pour l'orientation). Il se compose d'un panachage de 162 panneaux de deux types (42 Arcosolar M73 et 120 Arcosolar M75) d'une surface totale de 65.2 m2 (56.6 m2 de cellules), câblés par séries de 6 et regroupés en deux modules (d'une puissance nominale de 3.4 respectivement 4 kW selon les données du fabriquant).

Analyse entrée/sortie:
On peut se faire une bonne idée du fonctionnement des capteurs en analysant le comportement des puissances d'entrée/sortie du champs, à partir des mesures en continu faites par nous-mêmes ainsi que par Aemmer de l'Ecole d'Ingénieur de Bienne [1]. Dans chacun des deux cas il s'agit de mesures estivales.

L'écart manifeste entre ces deux sets de données provient d'une sous-estimation de l'ensoleillement par l'appareil de régulation développé par l'Ecole d'Ingénieur de Bienne, ainsi que nous le verrons plus loin. En se concentrant donc sur nos mesures, nous commençons par remarquer que la puissance électrique de 4.5 kW développée à 1000 W/m2 d'ensoleillement est largement en dessous de la puissance nominale de 7.4 kW annoncé par le fabriquant. Un des phénomènes majeur expliquant cette différence est la chute de l'efficacité de captage due à la montée en température des panneaux, qui accompagne un ensoleillement croissant. Ce phénomène est nettement visible sur la figure 23, une régression quadratique effectuée sur nos mesures {2} permettant de définir en pointe estivale une efficacité de captage sur plan capteur de 8.9% de base, diminués de 0.20% par 100 W/m2 d'ensoleillement.

Ainsi en plein été et à 1000W/m2 les panneaux montent facilement à 70°C, soit largement au-dessus des 25°C pour lesquels l'efficacité nominale est donnée. Cette montée en température dépend non seulement de l'ensoleillement mais encore de la température extérieure (via le coefficient de pertes thermiques que l'on peut estimer à 15 W/m2), ce qui signifie qu'un tel modèle entrée/sortie dépend de la saison. D'autre part l'efficacité réelle décrite par ce modèle comprend implicitement, outre le facteur

température, un ensemble de phénomènes physiques (voir plus bas) dont la dissociation demande le recours à un modèle plus complexe.

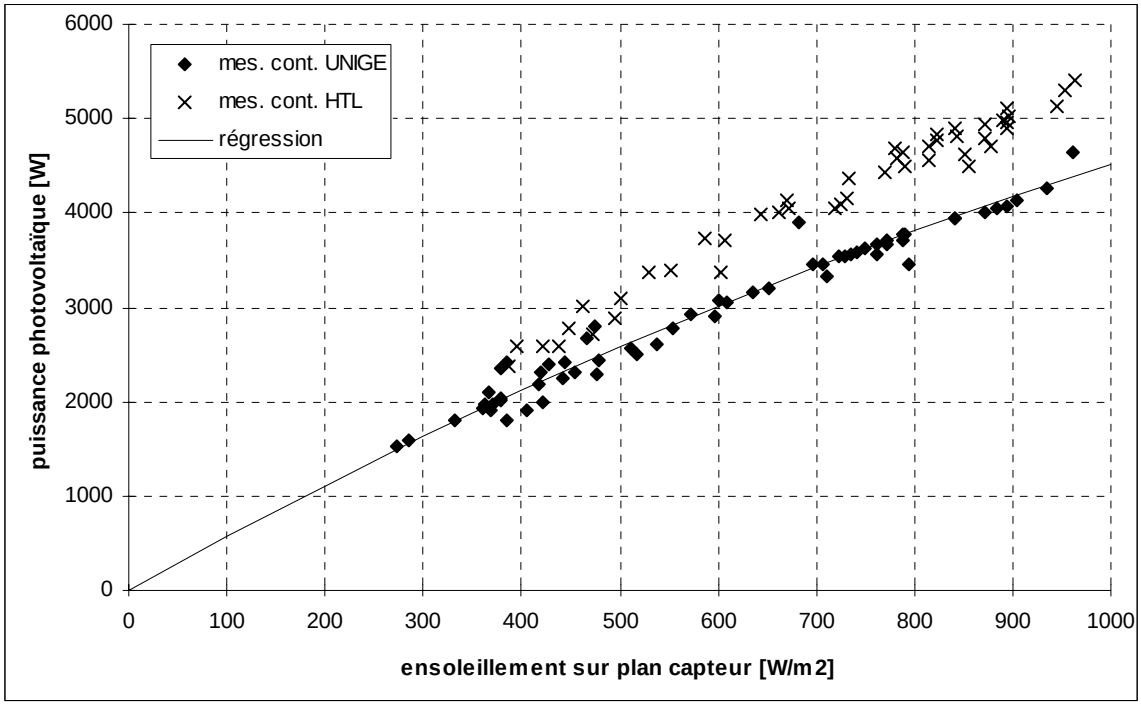


Figure 23: *Comportement estival des puissances d'entrée/sortie du champs de capteur photovoltaïque: Mesures en continu en pas de temps de 5 minutes des 27 et 28 juillet 1996 faites par nous même (UNIGE); Mesures en continu en pas de temps de 15 minutes des 14 et 30 août 1993 faites par l'Ecole d'ingénieur de Bienne (HTL).*

Remarquons encore que le bruit observé sur nos deux jours de mesure reflète le caractère variable de l'ensoleillement (voir annexe 3), une parties du plan capteur pouvant être dans l'ombre des nuages alors que le solarimètre ne l'est pas, ou vice-versa. Cette hypothèse est en effet confirmée par l'analyse des seules mesures du 14 août 1993, jour clair par excellence, ou encore de la tranche matinale « jour clair » du 28 juillet 1996, dont les points de mesure suivent quasi parfaitement les courbes de régression respectives.

Caractéristiques courant/tension:
Une caractérisation plus complète du champ photovoltaïque passe par une série de courbes courant/tension (figure 24) des panneaux. De telles courbes mettent en évidence leur rôle de générateur de courant, dont la valeur est à peu près constante pour un ensoleillement et une température donnés, chutant brusquement à zéro lorsque la puissance soutirée augmente au delà d'un certain seuil (chute de courant à tension trop élevée). Le courant fourni est à peu près proportionnel à l'ensoleillement, alors que la température des panneaux influence essentiellement la tension ouverte (tension maximale de fonctionnement).

La paramètrisation mathématique de telles courbes se fait généralement via le modèle à une diode, dont on trouvera une description dans la plupart des ouvrages concernant le photovoltaïque (p. ex [4]). Cette paramètrisation permet de recalculer la courbe de caractéristique normalisée (à température de fonctionnement de 25°C et ensoleillement de 1000 W/m2) à partir de données établies sous d'autres conditions. En procédant de la sorte à partir de mesures de caractéristiques faites par l'Ecole d'Ingénieur de Bienne et en comparant la puissance maximum ainsi normalisée à la puissance nominale du fabriquant on constate une surestimation de ce dernier de 9.5 respectivement 13.3 % pour les panneaux M73 et M75. Ceci est tout à fait compatible avec les écarts communément observé dans l'étude d'installations photovoltaïques (cf. [8], où une mesure détaillée de deux installations montre un défaut de caractéristique de 11% chacune). Les courbes de la figure 24 ont finalement été obtenues par le panachage (moyenne pondérée) des caractéristiques de chacun des deux types de panneaux.

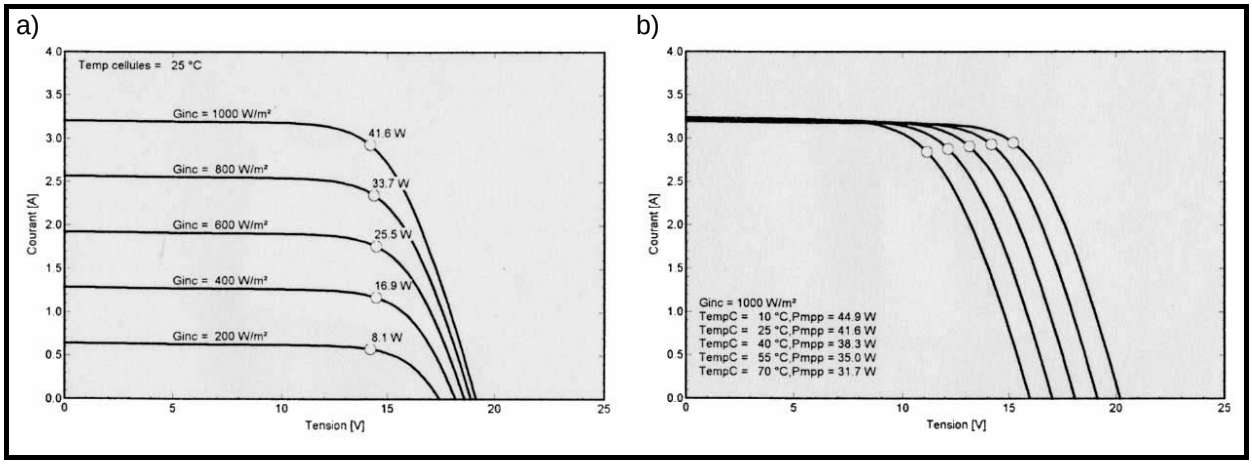


Figure 24: *Caractéristiques courant/tension d'un panneau photovoltaïque, mesurées par l'Ecole d'Ingénieur de Bienne et renormalisées aux conditions standard (1000W/m2, 25°C) via le modèle à une diode du logiciel Pvsyst.*

Outre d'être basé sur le modèle à une diode, couplé pour la température de fonctionnement à un modèle simple d'échange thermique, le logiciel Pvsyst [4] que nous emploierons par la suite inclut également la modélisation des pertes ohmiques due aux diodes de protection et au câblage (reliant les panneaux aux transformateur DC/DC), de l'angle d'incidence du rayonnement (réflexions), ainsi que des phénomènes de disadaptation des panneaux mis en série/parallèle, ce qui permet de détailler la discrépance entre puissance réelle et nominale (figure 25).

phénomène	puissance W	perte %
nominal	7.44	
défaut de caractéristique	6.60	11.3
température panneaux (74°C)	4.97	21.9
angle d'incidence	4.93	0.6
désadaptaion panneaux	4.85	1.0
diodes	4.80	0.7
câblage	4.50	4.1
total	4.50	39.6

Figure 25: *Détail de l'écart entre puissance photovoltaïque nominale et réelle pour un ensoleillement de 1000 W/m2 et une température extérieure de 20°C. Les pertes se ramènent toujours à la puissance nominale.*

Mesure d'ensoleillement du transformateur DC/DC:
La mesure d'ensoleillement affichée par le transformateur DC/DC se fait grâce à deux panneaux photovoltaïques supplémentaires, via les courbes de caractéristique livrée par le fabriquant. La chute de rendement réel par rapport au rendement nominal induit ainsi une sous-estimation de l'ensoleillement. Cet état de fait n'a pas de conséquence sur le bon fonctionnement du système, les valeurs de consignes pour l'électrolyseur étant données par la puissance photovoltaïque effective.

Validation du modèle PVSYST:
Afin de valider le modèle établi avec le logiciel Pvsyst, nous avons simulé la production photovoltaïque du champs sur la base des mesures météo des 27 et 28 juillet 1996. La figure 26 représente la comparaison des puissances photovoltaïques ainsi simulées avec les valeurs mesurées.

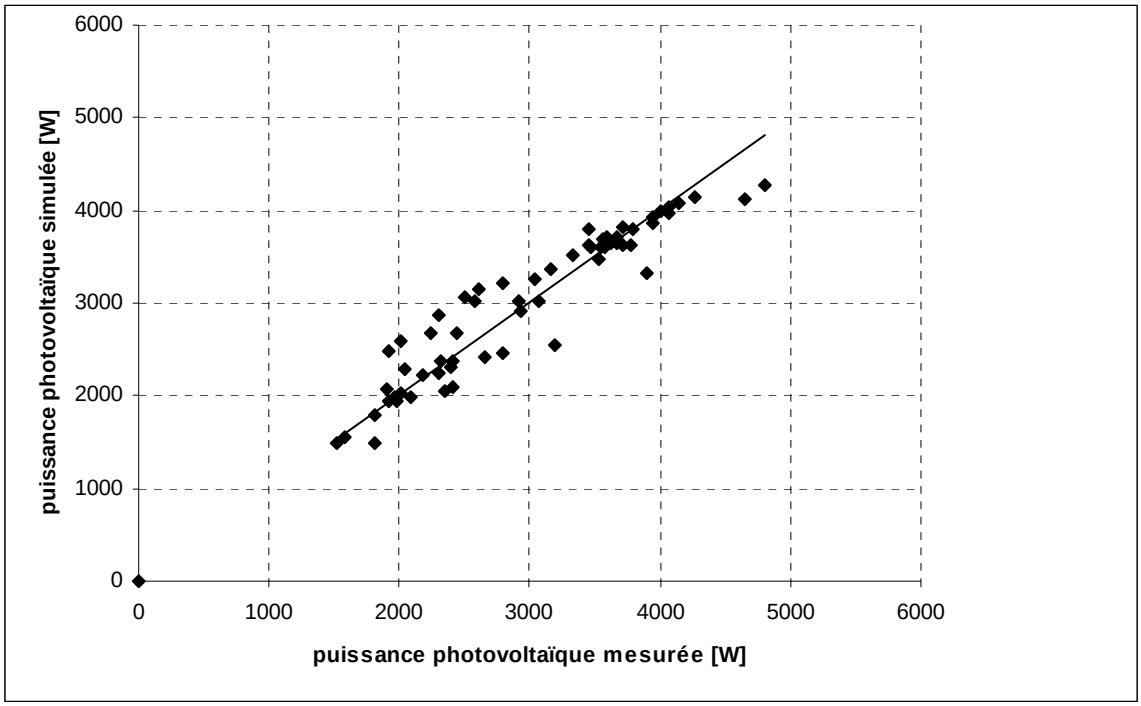


Figure 26*: Comparaison des puissances photovoltaïques mesurées et simulées grâce au logiciel Pvsyst, avec régression linéaire forcée par l'origine.*

On constate tout d'abord l'excellente corrélation moyenne (0.2% d'écart selon une régression linéaire forcée par l'origine). Les fluctuations s'avèrent par ailleurs être directement corrélées aux écarts entre valeurs mesurées et modèle de régression entrée/sortie, ce qui atteste le problème de mesure de l'ensoleillement sur un champs photovoltaïque étendu.

Génération du modèle entrée/sortie saisonnier:
Le modèle PVSYST étant ainsi validé, nous l'appliquons aux données météo standard de Bern-Liebefeld pour générer un modèle simplifié entrée/sortie tenant compte de l'effet saisonnier, et le comparons au modèle obtenu directement à partir de nos mesures (figure 27).

Nous constatons bien l'augmentation d'efficacité en mi-saison puis en hiver, due à la baisse de température des panneaux, ainsi que la bonne correspondance entre le modèle établi précédemment pour les jours de plein été et celui généré ici pour la totalité de la période (21 juin à 20 septembre). Les coefficients de régressions quadratiques {2} effectuées par saison se lisent sur la figure 27 et permettent de définir une efficacité de captage de base de 10.05 +/- 0.35 % (valeurs extrêmes pour saisons extrêmes), diminués de 0.28% par 100 W/m2 d'ensoleillement (0.23% en hiver).

saison	efficacité de captage	
	base	diminution
	%	%/(W/m2)
été	9.7	-0.0028
mi-saison	10.1	-0.0028
hiver	10.4	-0.0023

Figure 27: *Efficacité saisonnière du captage photovoltaïque: régressions quadratiques sur des données horaires générées grâce au logiciel PVSYST appliqué aux données météo standard de Bern-Liebefeld. Le découpage saisonnier se fait selon les solstices et équinoxes.*

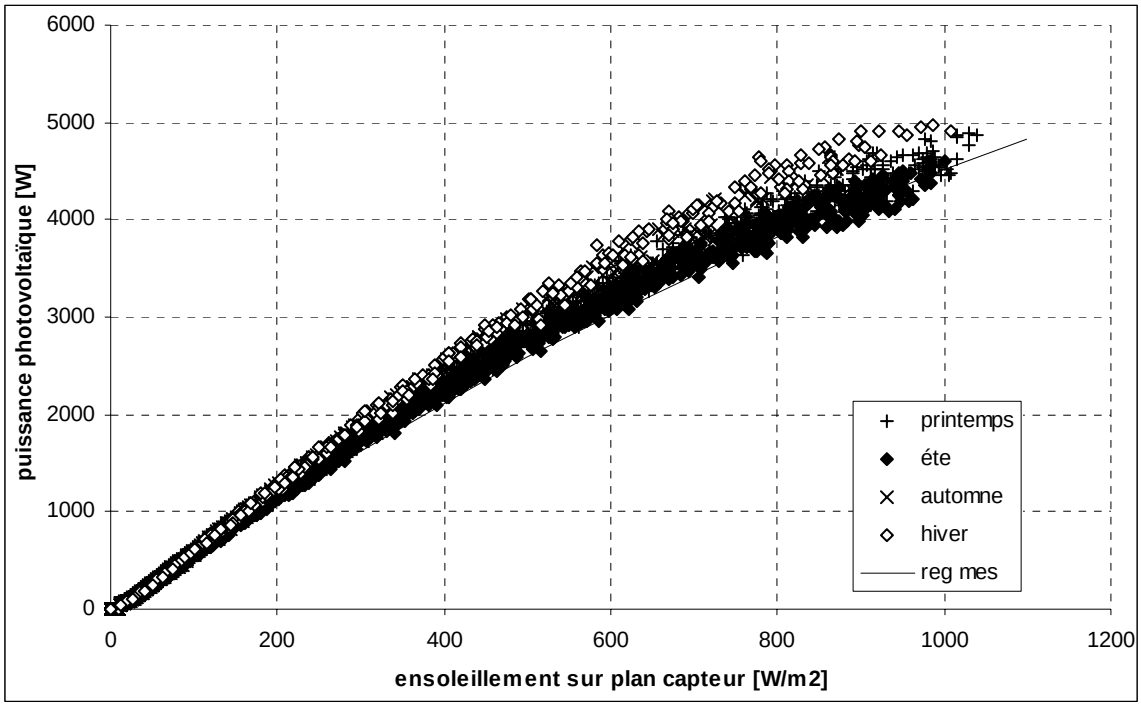


Figure 28: *Modèle entrée/sortie saisonnier du captage photovoltaïque: Données horaires générées grâce au logiciel PVSYST appliqué aux données météo standard de Bern-Liebefeld. Le découpage saisonnier se fait selon les solstices et équinoxes; Régression sur les mesures de deux jours d'été.*

Système de régulation et transformateur DC/DC

fabriquant	Ecole d'ingénieur de Bienne Quellgasse 21 CH - 2501 Bienne	
modèle	HMAX	
tension		
entrée	70 - 150 VDC	1
sortie électrolyseur	28 - 38 VDC	1
sortie accumulateurs	22 - 28.5 VDC	1
courant		
entrée	0 - 120 ADC	1
sortie électrolyseur	30 - 300 ADC	1
sortie accumulateurs	0 - 300 ADC	1
puissance nominale		
pour électrolyseur	11000 W	1
pour accumulateurs	8500 W	1
puissance auxiliaire	< 30 W	1
dimensions		
hauteur	158 cm	
largeur	55 cm	
profondeur	60 cm	
efficacité	96% dès 1800 W de puissance d'entrée	2

Figure 29: *Fiche récapitulative du transformateur DC/DC. Provenance des données: 1) Données fabriquant; 2) Mesure d'efficacité sur nos mesures en continu.*

Description de l'appareil:
Le transformateur DC/DC utilisé ici a été développé spécialement pour cette installation par l'Ecole d'Ingénieurs de Bienne [1]. Il constitue à la fois un des majeurs investissements qui ont été nécessaires à l'adaptation des composants à la source énergétique solaire et une pièce maîtresse de l'installation, puisqu'en plus de sa fonction de convertisseur au point de fonctionnement maximum il contient la gestion (actuellement encore manuelle) des divers modes de production (cf. plus bas) et que réside ainsi en lui un fort potentiel de gestion rationnelle de l'énergie incidente. Lors de la production d'hydrogène comme de la charge des accumulateurs, le transformateur cherche constamment à suivre le point de puissance maximale, par comparaison du fonctionnement en cours avec des fonctionnements à tension plus forte et plus faible (système MPPT: maximum power point tracker).

En plus de traquer le point de fonctionnement optimum, l'introduction de cet appareil a permis de s'affranchir d'une connexion particulièrement malheureuse existant initialement entre les capteurs photovoltaïques et l'électrolyseur. Ce dernier, de fabrication commerciale, étant conçu pour être branché sur le réseau, le courant photovoltaïque devait passer par un onduleur DC/AC avant d'alimenter l'électrolyseur qui contenait à son tour un onduleur, pour reconversion en courant continu utilisable pour l'électrolyse. Selon les estimations de l'école d'ingénieurs, l'économie de cette double conversion ajoutée à la plus-value du MPPT a permis une augmentation de 20% du rendement de production d'hydrogène, chiffre qu'il est impossible de vérifier après coup. Les deux onduleurs ont quant à eux été réutilisés pour le couplage de l'électrolyseur sur le réseau public, respectivement celui des accumulateurs sur le réseau domestique.

Modes de fonctionnement:
L'enclenchement/déclenchement des interrupteurs situés sur son tableau de commande permet le fonctionnement de l'installation selon quatre modes distincts:

1) Production d'hydrogène à partir des deux modules photovoltaïques branchés en parallèle.
2) Charge des accumulateurs à partir des deux modules photovoltaïques branchés en parallèle, optionellement accompagnée de production d'hydrogène à partir du réseau.
3) Charge des accumulateurs à partir du module de 4 kW, injection dans le réseau à partir du module de 3.4 kW, optionellement production d'hydrogène à partir du réseau.
4) Production d'hydrogène à partir du module de 4 kW, injection dans le réseau à partir du module de 3.4 kW.

Efficacité:
L'efficacité de la transformation résultante (rapport entre puissance photovoltaïque et puissance d'électrolyse) a été testée par Aemmer de l'Ecole d'Ingénieurs de Bienne lors de la mise en service de l'appareil, et peut également être déduite de leurs mesures en continu ainsi que des nôtres (27 et 28 juillet 1996).

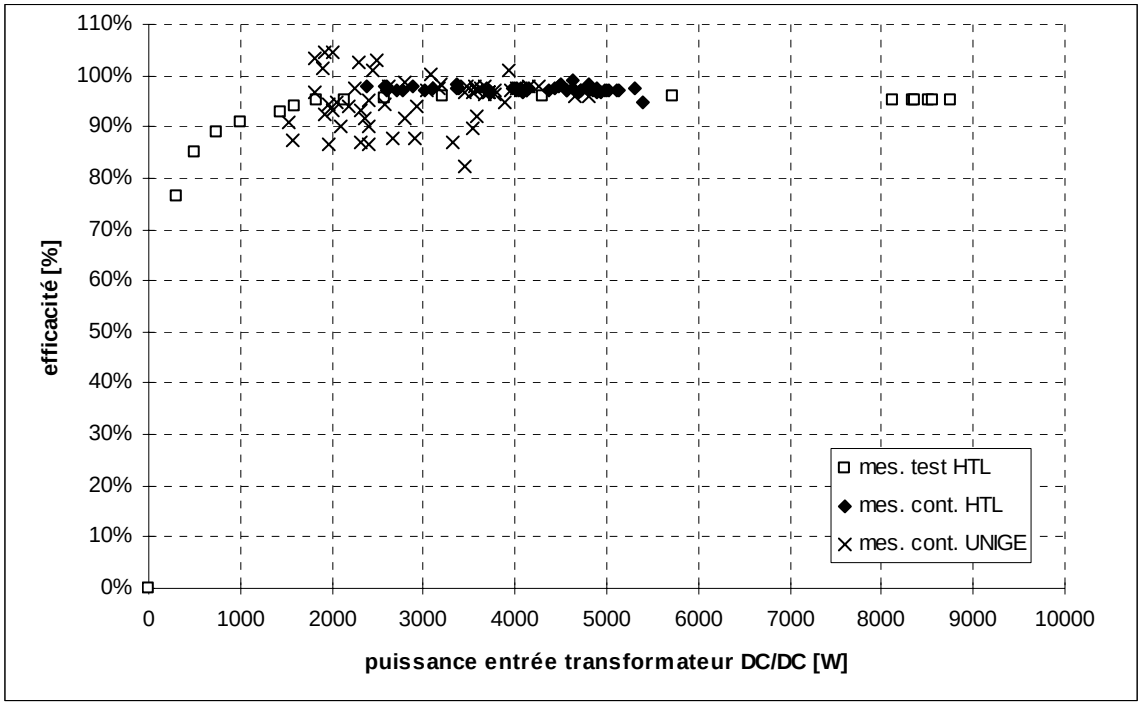


Figure 30: *Efficacité du transformateur DC/DC (rapport de puissances sortie/entrée): mesures test de mise en service et mesures en continu sur deux jours d'été de l'Ecole d'ingénieur de Bienne (HTL), ainsi que mesures en continu sur deux jours d'été effectuées par nous-mêmes (UNIGE). N'est ici pas prise en compte la puissance auxiliaire pour la régulation (<30W).*

Les mesures de Aemmer sont en très bonne concordance interne, et affichent une efficacité de conversion de plus de 95% à partir d'une puissance photovoltaïque d'entrée supérieure à 1800 W (puissance d'enclenchement de l'électrolyseur, cf. plus bas). Nos mesures affichent au contraire un caractère extrêmement fluctuant avec quelques points de mesure dépassant les 100% d'efficacité. La seule explication que nous puissions avancer est à nouveau le caractère variable de la météo et un possible temps de réponse ou d'échantillonnage différent de nos propres sondes de mesure (champs photovoltaïque) et celles de la régulation (électrolyseur). Quoi qu'il en soit la valeur moyenne de l'efficacité déduite de nos mesures se situe à 96%, ce qui est en bonne concordance avec les mesures d'Aemmer et la réputation dont bénéficient les transformateurs développés par l'Ecole d'Ingénieur de Bienne.

Lors d'un calcul efficacité global il faut encore tenir compte de l'alimentation auxiliaire constante de l'appareil, qui selon les concepteurs se situe en dessous des 30 W (950 MJ annuels).

Electrolyseur

fabriquant	VCST Hydrogen Systems Rellestraat 2 B - 3800 Sint-Truiden	
modèle	IMET 2	
cellules		
nombre	16	1
surface	600 cm2	1
plage de fonctionnement		
puissance	1800/1400 - 4600 W	1,3
courant	55/45 - 130 A	1,3
débit hydrogène	0.40/0.32 - 0.95 m3n/h	3
efficacité	66/65 - 60 %	3
température de fonction.		
consigne	50°C	1
moyenne	47°C	2
pression de fonction.	2 bar	1
densité électrolyte	1.27	1
hydrogène	99.8% +/- 1%	1
oxygène	99.5% +/- 1%	1
besoins en eau		
électrolyse	~ 3 lit/m3n	1
thermalisation gaz	~ 7.5 lit/h	2
thermalisation cellules	~ 40 lit/m3n	2
dimensions		
hauteur	179 cm	
largeur	60 cm	
profondeur	80 cm	
puissance auxiliaire	22 W	4

Figure 31: *Fiche récapitulative de l'électrolyseur. Provenance des données: 1) Données fabriquant; 2) Mesures en continu; 3)Mesure de caractéristique U/I; 4) Mesure ponctuelle. Remarque: les deux valeurs minimum de la plage de fonctionnement correspondent aux consignes d'enclenchement et déclenchement.*

Description de l'appareil:
Il s'agit là d'un électrolyseur à électrolyse alcaline à membranne. Le coeur de l'appareil est constitué d'un bloc de 16 cellules de 600 cm2 de surface, pouvant produire un maximum nominal de 2 m3n/h d'hydrogène à 99,8% de pureté, à une température de fonctionnement de 50°C et une pression de 2 bar. Depuis sa mise en service l'électrolyseur en question a également subi quelques changements, à savoir:

- l'extraction de l'onduleur mentionné au paragraphe précédent, contre l'hébergement du système de régulation gérant électroniquement toute la partie aval de la chaîne de production. Ce point constitue le deuxième grand investissement au niveau du couplage des sous-systèmes entre eux et avec le soleil.
- le remplacement du bloc de cellules d'électrolyse suite à un incident.
- l'adjonction d'un vase d'expansion sur le récipient de récolte de hydrogène, dont la production molaire est deux fois plus grande que celle d'oxygène, induisant dans la configuration initiale des problèmes de régulation de pression lors de la production variable qu'est la production solaire.
- la limitation du courant de production à 130 A, pour limiter les problèmes d'usure, impliquant un débit maximal réel de 0.95 m3n/h. Cette limitation n'influence pas la production solaire, le courant photovoltaïque maximum se situant toujours en dessous de cette limite. La production à partir du réseau se situe par contre ainsi plus proche de la production solaire et s'effectue avec une efficacité énergétique accrue (cf. plus bas).

Fonctionnement de l'électrolyse:
Lors de l'électrolyse le courant électrique amène l'énergie nécessaire à la séparation des molécules d'eau (H_2O) en leurs atomes constitutifs et leur recombinaison sous forme de gaz d'hydrogène (H_2) et oxygène (O_2). Afin de favoriser l'électrolyse on ajoute par ailleurs de la potasse (KOH) à l'eau, la solution portant le nom d'électrolyte. La séparation des gaz s'effectue naturellement par leur

constitution à l'une et l'autre des électrodes, selon la réaction détaillée explicitée en {3}, ce qui est fondamental vu le caractère explosif d'un mélange éventuel. Le débit de production d'hydrogène est proportionnel au courant appliqué et peut être exprimée sous forme de puissance emmagasinée par l'hydrogène, qui est donnée par l'énergie de séparation des molécules d'eau. Elle peut être exprimée par sa valeur inférieure (10.05 MJ/m3n) ou supérieure (11.88 MJ/m3n) selon que l'on considère ou non l'énergie libérée par la condensation de l'eau. Le choix de l'une ou l'autre de ces valeurs dépend de l'application considérée. Dans notre cas on prendra la valeur inférieure, l'eau résultant de la combustion étant utilisée sous forme gazeuse dans les pistons du moteur du véhicule.

La puissance consommée par l'appareil se décompose en sa partie utile (nécessaire à la dissociation de l'eau), sa partie ohmique (dissipée sous forme de chaleur par la résistance interne de l'appareil), ainsi qu'une fraction maintenant les surtensions anodiques et cathodiques {4}. Les pertes ohmiques maintiennent l'électrolyseur à sa température de fonctionnement, le solde étant évacué par de l'eau du réseau circulant dans un système de refroidissement, plongé dans le séparateur de gaz (tube en U) qui est relié au bloc de cellules. Un deuxième système de refroidissement ramène les gaz (hydrogène et oxygène) à la température de l'eau du réseau et condense ainsi une bonne partie de la vapeur d'eau provenant de l'électrolyte.

Caractéristique courant/tension:
Nous avons effectué une mesure de caractérisation courant/tension de l'électrolyseur à différentes températures (fixées par l'intermédiaire de son système de régulation, qui gère le débit de thermalisation des cellules).

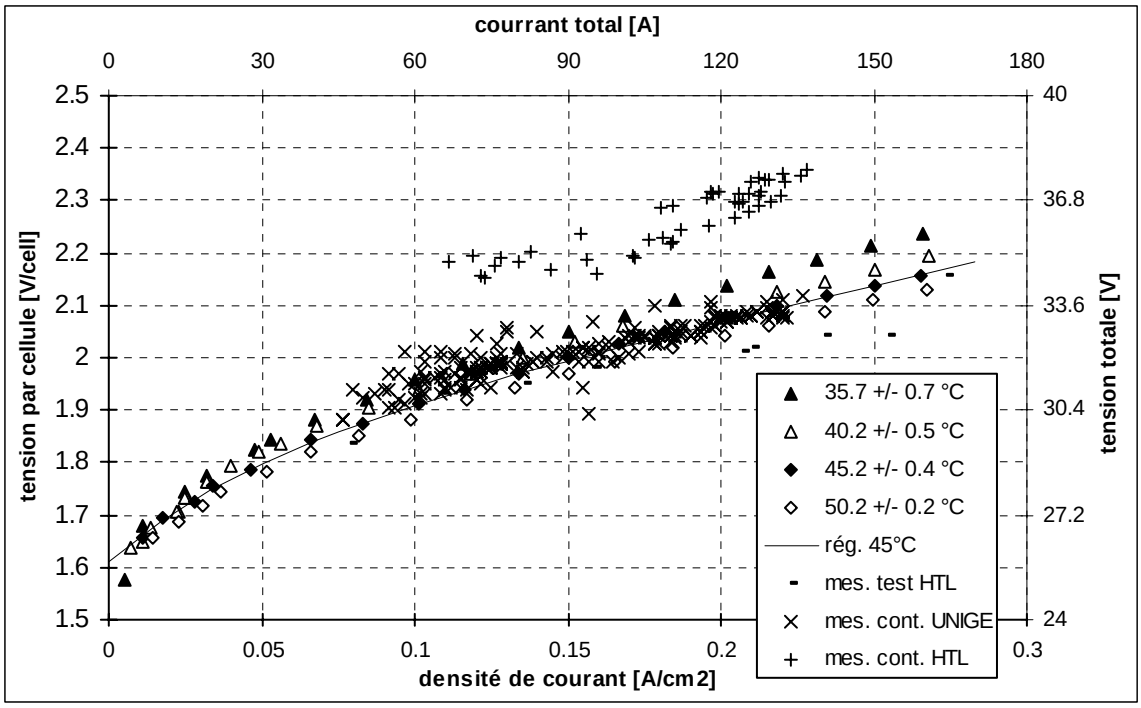


Figure 32: *Caractéristique courant/tension de l'électrolyseur: Mesures (avec source de courant DC indépendante) à différente température (densité d'électrolyte de 1.27) ainsi que régression exponentielle pour la température de 45°C; Mesures test de l'Ecole d'Ingénieur de Bienne (HTL); Mesures en continu effectuées par nous-mêmes (UNIGE) et par l'Ecole d'Ingénieur de Bienne (HTL).*

La caractéristique observée est tout à fait comparable à celles d'électrolyseurs mesurés de par ailleurs [6,7]. On observe bien le comportement exponentiel de la croissance de tension (formation des surtensions anodique et cathodique) en faible régime (I < 90 A), suivi d'un accroissement linéaire provenant des pertes ohmiques, soit l'habituel accroissement quadratique de la puissance électrique en fonction du courant. Cette dépendance quadratique est à mettre en relation avec la dépendance linéaire du débit d'hydrogène en fonction du courant, d'où une baisse d'efficacité de l'électrolyse en fonction de la puissance électrique d'entrée (cf. plus bas). Nous observons par ailleurs une bonne concordance de nos mesures en continu avec la mesure de caractéristique, les écarts s'expliquant essentiellement par les montées en température à l'enclenchement (cf. plus bas)

Revenons encore rapidement sur les mesures d'Aemmer, de l'Ecole d'Ingénieur de Bienne. Ses mesures de test sont à nouveau en bonne concordance avec les nôtres, alors que ses mesures en continu sont cette fois-ci fortement éloignées. Cet écart ne saurait guère s'expliquer par un simple dysfonctionnement de la température de réglage de l'époque, ainsi que le montre la réponse en température de nos mesures, ni probablement par les chutes de tensions des câbles de transmission (sa mesure en continu ayant vraisemblablement été prise à la sortie du convertisseur DC/DC). Reste l'explication à peine plausible d'une erreur dans la concentration de potasse des deux jours en question, ou celle d'une erreur de mesure.

Consignes d'enclenchement/déclenchement:
Remarquons que la production à faible courant ne garanti plus une bonne dissociation des gaz O_2 et H_2 et comporte donc des risques d'explosion. Pour cette raison la régulation déclenche l'électrolyseur au dessous d'une puissance de consigne minimum. Afin d'éviter une suite répétée de mises en marche/arrêts lors d'un ensoleillement variable, la consigne d'enclenchement est quant à elle légèrement supérieure. Ce comportement est bien visible dans l'étude dynamique de nos mesures en continu (figure 10 et annexe 3), où l'on remarque clairement les phénomènes d'enclenchement et déclenchement ainsi que les montées/descente en température associées.

Selon une communication privée de Aemmer (qui a développé le transformateur DC/DC, qui fournit le courant photovoltaïque ainsi que le signal de mise en marche), les consignes d'enclenchement et déclenchement sont respectivement d'environ 1800 et 1400 W photovoltaïque, ce qui se traduit selon la caractéristique courant/tension par des courants d'électrolyse de 55 respectivement 45 A. Ces valeurs sont compatibles avec nos mesures en continu (cf. annexe 3), qui ne permettent cependant pas de les déterminer plus précisément, l'échantillonnage par pas de 5 minutes faussant les mesures lors de l'enclenchement respectivement déclenchement.

Comportement en température:
Pour revenir à la question de la température de l'électrolyse en fonctionnement réel, indiquons tout d'abord que les fluctuations observées dans la comparaison de nos mesures en continu avec les mesures de caractéristique courant/tension sont essentiellement dues à la montée en température, ainsi que le montre l'élimination de ces points dans la figure 32. En ce qui concerne la dépendance en température de la caractéristique courant/tension de l'électrolyseur, on constate en effet sur les courbes de caractéristique qu'une augmentation de celle-ci induit une légère diminution de la tension, soit une (très) légère augmentation de l'efficacité de l'électrolyse (voir plus bas). Au vu de cela il serait évidemment souhaitable d'augmenter la température de fonctionnement, ce qui, dans la configuration actuelle, pose cependant des problèmes d'usure des joints entre les cellules. La valeur moyenne de 47°C pour la température de fonctionnement de l'électrolyseur au cours des cinq jours de mesures en continu (incluant les montées en température) nous fait par ailleurs choisir la régression exponentielle à 45°C {4} comme caractéristique moyenne de l'appareil.

Efficacité:
Comme indiqué précédemment, on peut définir l'efficacité de l'électrolyse par le rapport entre la puissance électrique utile (nécessaire à la dissociation de l'eau, çàd contenue dans la liaison chimique de l'hydrogène) et la puissance totale (dissociation de l'eau, pertes ohmiques, surtensions anodiques et cathodiques), soit entre tension utile et tension totale (recalculée via la régression statistique à 45°C). Cette dernière est déduite du contenu énergétique inférieur de l'hydrogène en conditions normales de pression et température (cf. constantes physiques) et vaut 1.25 V/cell, soit 20 V au total. L'efficacité situe ainsi entre 66 et 60% sur la plage de fonctionnement de 45 à 130 A.

Dans le cadre d'un bilan énergétique complet de l'appareil, s'ajoutent à ces pertes la puissance auxiliaire de régulation, dont la valeur mesurée oscille entre 20 et 24 W selon l'état des vannes électroniques, et peut donc être considérée comme constante et indépendante de la production d'hydrogène: à 22 W de moyenne cette composante totalise 690 MJ annuels.

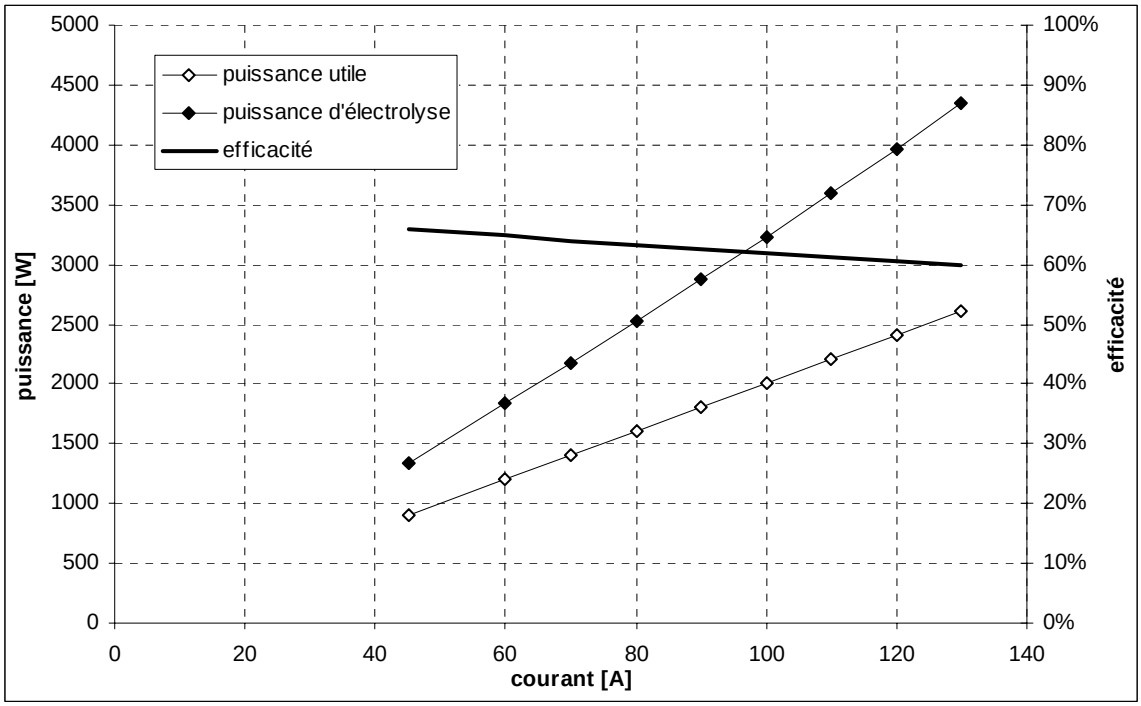


Figure 33: *Efficacité moyenne de l'électrolyseur, définie comme le rapport entre tension totale (dissociation de l'eau, pertes ohmiques et surtensions anodiques et cathodiques) et tension utile (dissociation de l'eau à condition de pression et température normales) sur la plage de courant utile. N'est ici pas prise en compte la puissance auxiliaire pour la régulation (22 W).*

Consommation en eau:

En ce qui concerne la consommation en eau, l'électrolyse a comme nous allons le voir un rôle mineur face au système de thermalisation des gaz et plus encore du bloc de cellules d'électrolyse (évacuation des pertes thermiques dès que la consigne en température est atteinte):

- Le débit d'eau dissocié est proportionnel au débit d'hydrogène produit et est déterminé par le rapport des volumes molaires {5}. Pour une production de 1m3n/h il vaut 0.75 lit/h, ce qui selon le fabriquant nécessite un débit réel d'eau du réseau d'environ 3 lit/h, celle-ci passant par un filtre de déminéralisation à osmose inversée.
- Le débit d'eau pour la thermalisation des gaz est fixe (indépendant de la quantité d'hydrogène produite) et a été estimé à 7.5 lit/h par une mesure ponctuelle.
- Le débit de thermalisation des cellules d'électrolyse est également fonction de la production. Pour une production de 1m3n/h il doit être supérieur à 18 lit/h, débit qui dans l'hypothèse d'un transfert de chaleur parfait provoquerait un échauffement de l'eau à la température de consigne de l'électrolyseur {6}. On peut donc facilement s'attendre à ce que ce dernier poste soit en réalité de l'ordre de 20 à 30 lit/h pour une production de 1m3n/h.

Cette analyse est confirmée par un relevé manuel du compteur d'eau (tous trois débits confondus) au long de la matinée du 26 juillet, mis en relation avec les temps d'ouverture des trois vannes (figure 34). On remarque qu'aussi longtemps que la température de l'électrolyte n'a pas atteint sa valeur de consigne (pas de thermalisation de ce dernier), le débit d'eau est relativement faible, de l'ordre de 5 à 8 lit/h. Lorsqu'au contraire la consigne est atteinte et que la thermalisation de l'électrolyte commence, le débit croît rapidement et atteint quelques 30 à 40 lit/h. Cette consommation accrue qui est à mettre en relation avec des temps de plus en plus long d'ouverture de la vanne correspondante, suit la courbe de production qui atteint elle de 0,8 à 0,9 m3n/h. La vanne de thermalisation s'ouvre quant à elle de façon constante environ 20% du temps, alors que la vanne d'apport d'électrolyte s'ouvre plus sporadiquement, de façon assez conséquente lorsque la production augmente en fin de matinée.

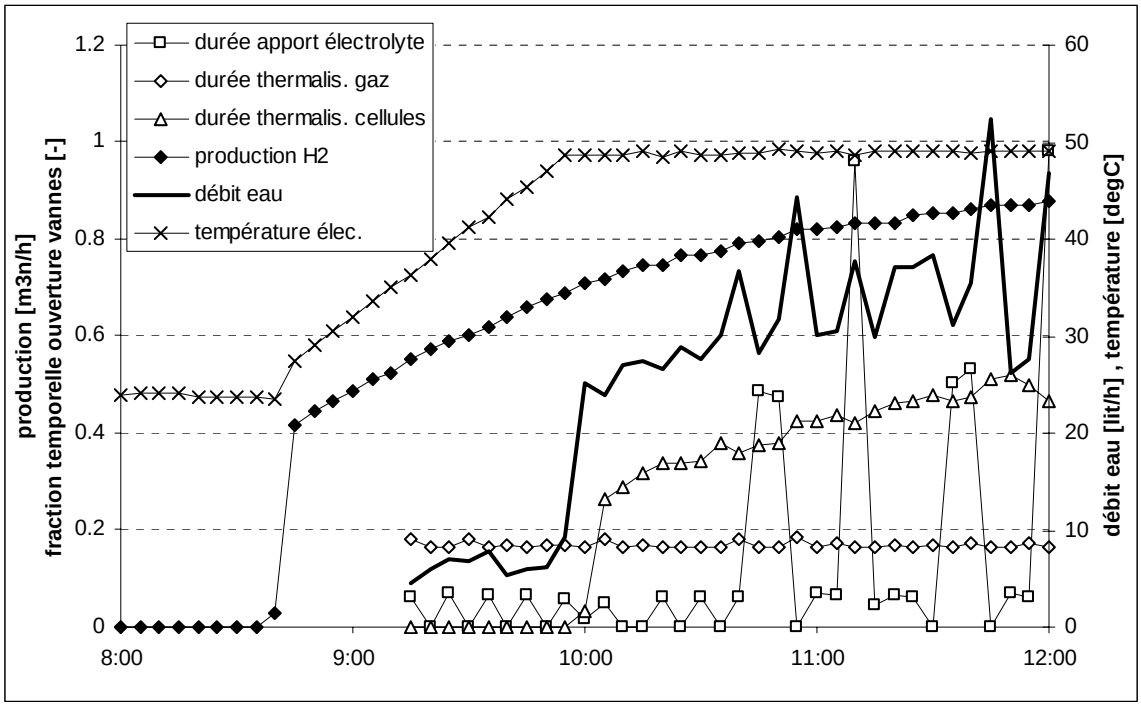


Figure 34: *Evolution dynamique du besoin en eau pendant la matinée du 26 juillet: Débit d'eau total; Fraction temporelle d'ouverture des vannes d'apport à l'électrolyte, de thermalistion des gaz, de thermalisation de l'électrolyte; Production d'hydrogène; Température de l'électrolyte.*

Purificateur/Sécheur

fabriquant	inconnu	
dimensions globales (rinceur, condensateur, sécheur)		
hauteur	105 cm	
largeur	70 cm	
épaisseur	20 cm	
sécheur		
température de consigne	85°C	2
temps de montée en cons.	45 min (de 25 à 85°C)	2
puissance de chauffage		
montée en temp.	200 W	2
maintient consigne	60 W	2
capacité calorifique	7.2 kJ/K par botte	2
facteur de pertes	0.9 W/K par botte	2
débit de régénération	0.2 m3n/h	1
pertes par régénération	~ 8%	3
dimension bottes		
hauteur	50 cm	
diamètre	16.5 cm (isolation comprise)	
épaisseur isolation	2.5 cm	

Figure 35: *Fiche récapitulative du purificateur/sécheur. Provenance des données: 1) Données fabriquant; 2) Mesure sur deux cycles de montée en température; 3) Mesures en continu.*

Bain de rinçage:
Le rinceur est constitué d'un cylindre rempli d'eau (en provenance du système de refroidissement des gaz de l'électrolyseur), et est traversé par le débit d'hydrogène qui y dépose se traces de potasse. Aucune perte d'énergie ne se fait à ce niveau là.

Condensateur:
Cet élément contient un granulat à base d'un métal noble qui catalyse la recombinaison des traces d'oxygène avec l'hydrogène. La réaction étant exothermique, les traces d'eau générées le sont sous forme gazeuse et sont emportées avec l'hydrogène vers le sécheur. La perte relative d'hydrogène enregistrée par cette réaction est de l'ordre du pour-mille (ordre de grandeur des traces d'oxygène), ce qui est négligeable dans le bilan global.

Sécheur:
Le sécheur est composé de deux filtres moléculaires dont l'un, actif, est traversé par l'arrivée d'hydrogène dont il piège les traces d'eau, pendant que l'autre, passif, est régénéré par thermalisation à 85°C et élimination des vapeurs d'eau par un flux d'hydrogène propre, prélevé sur la production traitée. Une fois la colonne active saturée (traitement de 2 m3n), son rôle est inversé avec la colonne qui vient d'être régénérée.

Le débit de régénération est selon le fabriquant fixé à 200 litn/h pour une production initialement prévue constante à 2 m3n/h, ce qui impliquait un prélèvement de 10% sur la production brute d'hydrogène. La valeur inférieure et variable de la production solaire rendait ce prélèvement trop élevé. La régulation actuelle induit donc une ouverture intermittente de la vanne de régénération, à condition que la température de thermalisation soit atteinte. En effet, le chauffage de la colonne de régénération est automatiquement interrompu lorsque la production s'arrête (ensoleillement trop faible) et doit à chaque nouvel enclenchement ramener la température à sa valeur de consigne, différant d'autant le micro-cycle de régénération.

Evolution dynamique:
Ce comportement est tout à fait visible sur les mesures en continu (cf. figure 11 et annexe 3). On y remarque clairement l'alternance d'utilisation des bottes utilisées respectivement pour le séchage (température ambiante) et pour la régénération (température de consigne), ainsi que l'utilisation intermittente de la régénération, lorsque la température de consigne est atteinte uniquement. On observe également le caractère extrêmement fluctuant de la production nette recueillie dans le ballon. Ceci provient de la mesure par différentielle de pression {7}, la précision de la mesure de pression

dans le ballon étant de l'ordre du Pa, soit 10 % de l'augmentation moyenne observée sur un pas de temps de 5 minutes. Cette imprécision instantanée peut cependant être levée en augmentant le pas de temps d'observation.

Efficacité:
Afin de déterminer la quantité d'hydrogène prélevée pour la régénération du sécheur nous considérons donc les productions nette (ballon) et brute (électrolyseur) cumulées sur les cinq jours mesurés en continu. Leur rapport détermine une perte par prélèvement de 3%, soit bien moins que les 10% annoncés par le fabriquant. Toujours au vu de la méthode de mesure du débit net {7} la perte mesurée pourrait cependant être sujette à une erreur systématique, donnée par l'addition des imprécisions sur la pression (2%) et la détermination du volume (3%) du ballon, soit une imprécision de 5%. Par souci de consistance avec le fabriquant nous retiendrons donc finalement pour la perte par prélèvement la valeur supérieure donnée par la mesure, soit 8%.

La deuxième perte énergétique est constituée par le chauffage du sécheur, d'une puissance électrique de 200 W en phase de montée en température de consigne, 60 W en phase de maintient de la consigne. La détermination de son évolution temporelle nécessite, selon un modèle simple d'échange thermique {8}, outre la connaissance de l'état de production de l'électrolyseur, celle de la capacité calorifique et du facteur de pertes thermiques des bottes du sécheur. Une régression effectuée sur une montée en température de chacune des deux bottes (figure 36) permet de déterminer ces coefficients: 7.2 kJ/K pour la capacité calorifique (équivalent à un peu moins de deux litres d'eau), 0.9 W/K pour le coefficient de perte thermique. Pour un calcul en pas de temps horaire (supérieur aux 45 minutes de montée en température) il suffit cependant de connaître l'état de production et la puissance moyenne associée: 0 W à l'arrêt, 165 W à enclenchement (par pondération temporelle des puissances de montée et maintient), 60 W en phase de maintient.

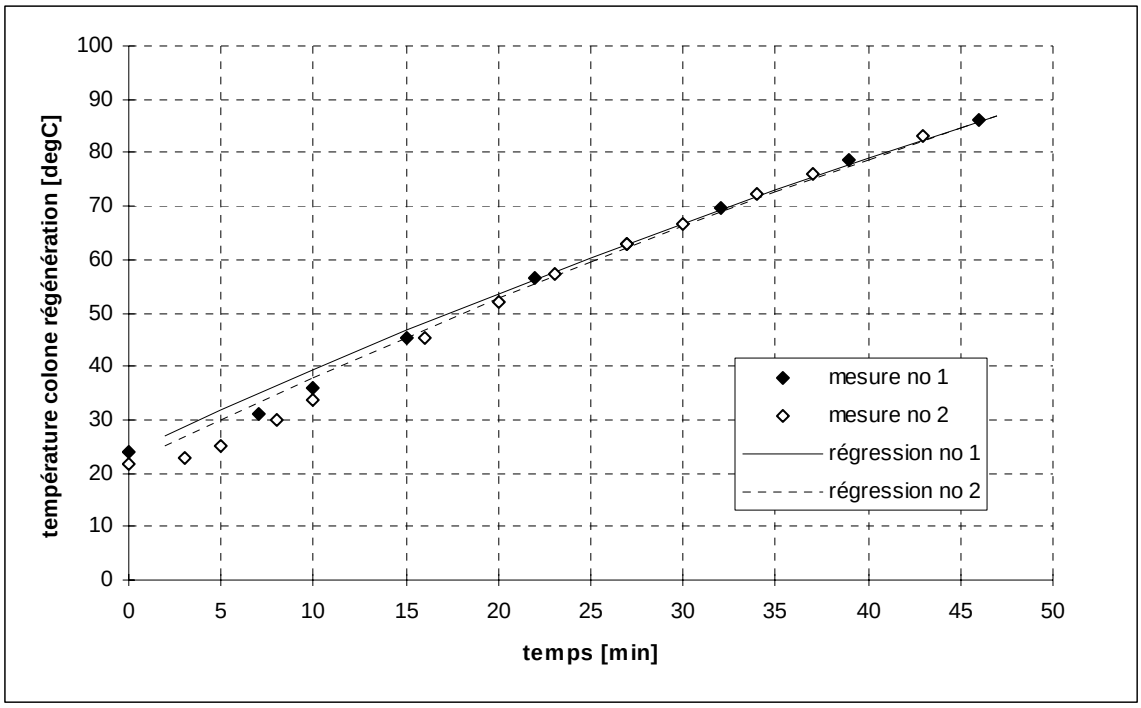


Figure 36: *Montée en température de consigne de chacune des deux bottes du sécheur et régressions correspondantes.*

Ballon de stockage intermédiaire

fabriquant	Brand Anlagebau Bahnhofstrasse 2 CH - 3432 Lützelflüh	
volume intérieur	454 +/- 13 lit	1
pressions de consigne		
supérieure	1.9 bar	2
inférieure	0.6 bar	2
capacité utile	0.59 m3n	1
dimensions		
hauteur totale	195 cm	
hauteur ballon	180 cm	
diamètre	60 cm	

Figure 37: *Fiche récapitulative du ballon collecteur. Provenance des données: 1) Mesure par injection contrôlée via un débitmètre; 2) Mesures en continu.*

Description:
Le ballon collecteur, dont nous avons calibré le volume (455 +/- 10 litres) par injection contrôlée d'hydrogène via un débitmètre {7} permet de stocker la production nette d'hydrogène de façon temporaire en attendant sa compression dans le stock final d'hydrures métalliques. A cet effet sa pression peut être augmentée jusqu'à 1.9 bar, le compresseur se mettant alors en marche jusqu'à l'avoir vidé à 0.6 bar. Sa capacité de stockage est ainsi de 0.59 m3n d'hydrogène, d'un contenu énergétique inférieur de 1.95 kWh. Aucune perte n'est à signaler au niveau de cet élément.

Evolution dynamique:
La représentation dynamique des mesures en continu (cf. figure 12 et annexe 3) permet de bien mettre en évidence, outre l'évolution évidente de la pression, la légère augmentation/diminution en température qui accompagne l'injection (production) respectivement le soutirage (compression) d'hydrogène au niveau de cet élément. Vu le couplage thermique non nul de la sonde de température avec l'air ambiant (voir le comportement hors période de production dans l'annexe 3) nous n'avons cependant pas utilisée cette dernière mesure pour une correction en température du calcul de débit net d'hydrogène, qui a été faite à température normale de 20°C {7}.

Compresseur

fabriquant	Corken P.O. Box 12338 USA - Oklahoma City, OK 73 157	
modèle	D191 AM4FBAB	
cycle de compression		
puissance	~ 3.2 kW	1
durée	~ 150 s	1
énergie	0.125 kWh	1, 2
énergie auxiliaire spécifique	0.763 MJ/m3n	1, 2
efficacité		
énergétique	92 %	3
mécanique	35 %	4

Figure 38: *Fiche récapitulative du compresseur. Provenance des données: 1) Mesure détaillée de trois cycles de compression; 2) Mesures en continu; 3)Rapport entre contenus énergétiques utile et total; 4) Rapport entre énergie mécanique utile et énergie électrique consommée.*

Description:
A chaque fois que le ballon collecteur a atteint sa pression de consigne supérieure, le compresseur se met en marche et le vide de son contenu pour l'injecter dans le stock d'hydrures, à concurrence d'une pression de 29 bar.

Efficacité:
Nous avons effectués pour trois cycles de compression ainsi définis la mesure de leurs durées, de l'évolution de la puissance électrique consommée ainsi que celle de la contrepression du stock d'hydrures (figure 39).

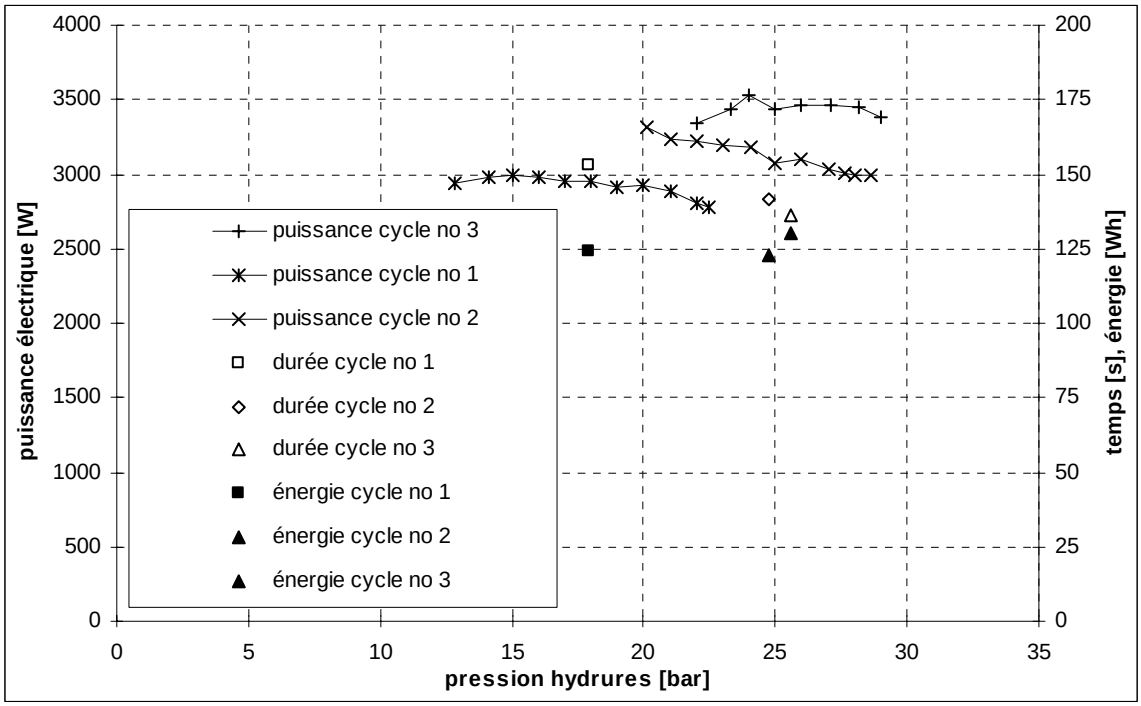


Figure 39: *Caractéristiques de trois cycles successifs de compression vers le stock d'hydrures des 0.59 m3n d'hydrogène compris dans le ballon collecteur qui est vidé de 1.9 à 0.6 bar: Evolution de la puissance électrique consommée par le compresseur en fonction de la contrepression (un cycle = un ensemble de points reliés entre eux); Durée et énergie totales du cycle (un cycle = un point).*

On remarque clairement l'effet de contrepression du stock d'hydrures qui fait grimper la puissance moyenne d'un cycle à l'autre (alors qu'elle a une légère tendance à diminuer en cours de cycle). La

durée de compression diminue quant à elle en fonction de la contrepression, si bien que l'énergie moyenne par cycle de compression complet se situe de façon relativement constante autour des 0.125 kWh, valeur confirmée par l'étude des mesures en continu. Ramenée à la masse d'hydrogène ainsi compressée, cette valeur donne une énergie spécifique de compression de 0.763 MJ/m3n. Comparé au contenu énergétique inférieur de l'hydrogène il en résulte que l'équivalent de 7.6 % de la production d'hydrogène nette doit être amenée sous forme électrique pour effectuer la compression. L'efficacité énergétique (rapport entre contenus énergétiques utile et total) s'élève ainsi à 92.4%. Cette valeur n'est pas à confondre avec l'efficacité mécanique, qui est définie par le rapport entre l'énergie mécanique fournie par la compression et l'énergie électrique consommée à cet effet. Pour une compression d'une surpression initiale de 1.3 bar (surpression moyenne dans le ballon) vers une surpression finale de 29 bar (surpression maximale dans le stock d'hydrures métalliques) l'énergie mécanique utile s'évalue à 0.26 MJ/m3n {9}, ce qui donne une efficacité mécanique de 35%.

Stock d'hydrures métalliques

fabriquant	Japan Metals & Chemicals No 8-4 Koami-Cho, Nionbashi, Cuo-Ku J - Tokyo	
composition	$Ti_{0.98}Zr_{0.02}V_{0.43}Fe_{0.09}Cr_{0.05}Mn_{1.5}$	
pression maximale		
nominale	30 bar	1
consigne	29 bar	2, 3
capacité totale		
nominale	19 m3n	1
mesurée	15.2 m3n à 5.3°C	2
capacité massique mesurée		
par rapport aux hydrures	1.3 %	2
par rapport au poids total	0.54 %	2
volume		
enceinte	17 lit	2
circuit thermalisation	20 lit	2
hydrures	15 lit	2
libre (gaz)	40 lit	2
total	91 lit	2
poids	235 kg	2

Figure 40: *Fiche récapitulative du stock d'hydrures métalliques. Provenance des données: 1) Données fabriquant; 2) Mesures faites par nous-même; 3) Mesures en continu.*

Description du stock:
Le stock final est constitué d'une enceinte en inox d'environ 91 litres comprenant un circuit de thermalisation, en l'occurrence inutilisé, ainsi que le récipient de stockage à proprement parlé, rempli d'une poudre d'hydrures métalliques. Une mesure dont nous reprendrons ici les principaux résultats, effectuée par Joubert du Laboratoire de Cristallographie de l'Université de Genève [2], permet d'estimer les contributions respectives de ces éléments:

- volume de l'enceinte: 17 litres
- volume du circuit de thermalisation: 20 litres
- volume des hydrures: 15 litres
- volume libre dans le récipient de stockage: 40 litres

Fonctionnement des hydrures:
La poudre d'hydrures est constituée d'un alliage métallique, ici le $Ti_{0.98}Zr_{0.02}V_{0.43}Fe_{0.09}Cr_{0.05}Mn_{1.5}$, qui fonctionne comme une éponge à hydrogène: à l'absorption les molécules d'hydrogène sont en quelque sorte dissoutes dans l'alliage, en ce sens qu'une liaison chimique les libère de leur électron qui va participer au nuage d'électrons libres de l'alliage, alors que les protons, de taille minime, sont intégré dans la structure cristalline. La réaction menant à cette liaison s'avère être énergétiquement favorable et libère donc de la chaleur (réaction exothermique), cédée à l'environnement en principe via le circuit de thermalisation, mais ici directement via l'air ambiant. Elle a lieu grâce à une relativement faible pression, de l'ordre de 10 bar à température ambiante, jusqu'à saturation de l'alliage caractérisé par une rapide montée en pression nécessaire à la poursuite de l'injection d'hydrogène. Inversement, à la désorption, la réaction prend de la chaleur sur l'environnement (réaction endothermique), la pression restant également relativement stable jusqu'à une concentration minimale en deçà de laquelle, pour poursuivre l'extraction d'hydrogène, la pression doit être fortement diminuée.

Caractérisation concentration/pression:
Cette caractéristique est habituellement présentée sous la forme d'une série de courbes concentration d'hydrogène/pression à température fixe, telle que celle établie expérimentalement par Joubert pour le stock en question (figure 41), à température de l'eau du réseau en hiver, utilisée alors pour la thermalisation. Outre le phénomènes de plateau d'absorption/désorption flanqué des branches de saturation à haute et faible concentration on observe également un phénomène classique d'hystérèse, çàd une séparation des plateaux à l'absorption (pression plus haute) et à la désorption

(pression plus basse). Cette mesure se laisse par ailleurs bien comparer aux isothermes publiées lors du dépôt de brevet concernant le matériau (cf. [2]).

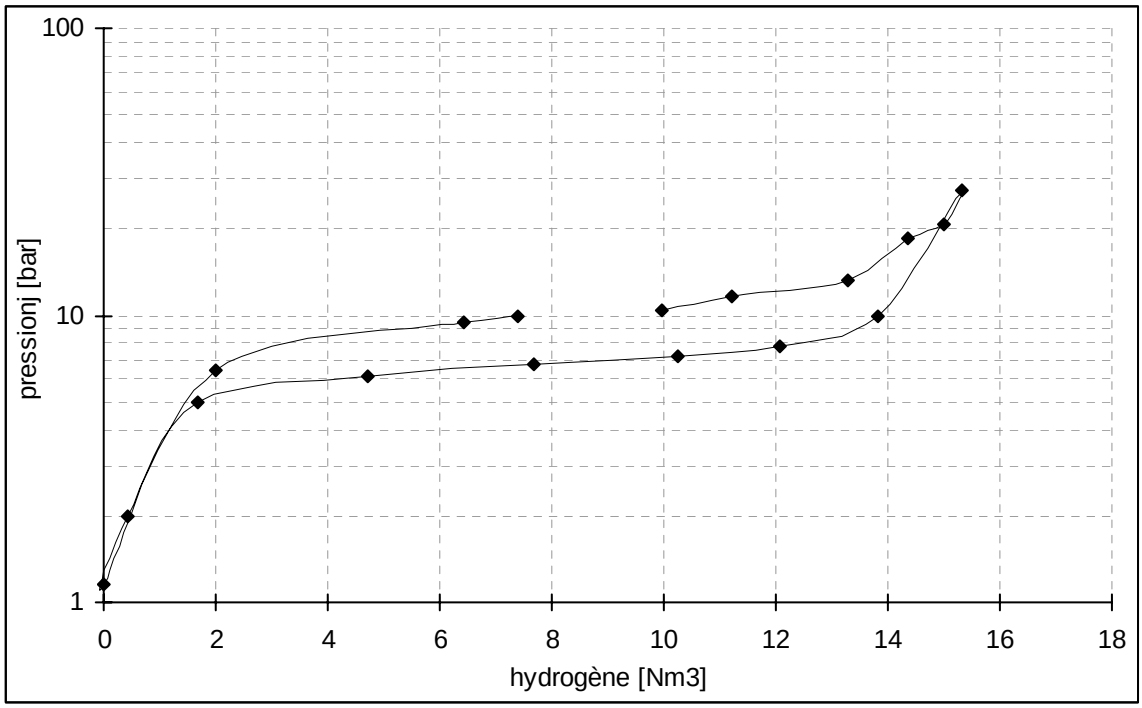


Figure 41: *Caractéristique de concentration d'hydrogène en fonction de la pression, à température constante de 5.3°C.*

La capacité de stockage entre 1.2 et 27 bar est ainsi mesurée à 15.2 m3n d'hydrogène (14 m3n sous forme de liaison à l'alliage, 1.2 m3n sous forme gazeuse dans le volume libre) représentant 166.4 MJ. Cette valeur est certes de 20% inférieure à la valeur indiquée par le fabriquant, mais peut s'expliquer par un cumul d'hypothèses allant de la non-conformité des spécifications, à de probables vieillissement et/ou contamination du matériau, en passant par les erreurs de mesure. En tout et pour tout le maintient quelque peu délicat de la capacité du stock (cf. plus bas le problème de contamination) au cours des six années de fonctionnement s'avère ainsi relativement satisfaisant.

Energie de stockage/déstockage:
Il est également possible d'évaluer la chaleur cédée/prise à l'environnement lors du stockage/déstockage complet, ceci grâce à la relation existant entre les pressions du plateau d'absorption/désorption et les température des isothermes, à contenu fixe d'hydrogène, que l'ont obtient des courbes citées plus haut et avec lesquelles la mesure de Joubert est compatible (cf. [2]). L'échange (gratuit) de ces 14.4 MJ d'énergie thermique avec l'environnement prend un certain temps, exagérément prolongé ici par la non-utilisation du circuit de refroidissement.

Avantages/désavantages:
Les avantages de ce stockage en hydrures métalliques à 29 bar (30 bar nominal) par rapport à un stockage en bouteilles à 200 bar sont les suivants:

- Sécurité optimale. Le besoin en apport calorifique de la désorption implique en effet qu'une fuite ou même une rupture de l'enceinte ne laisserait sortir que très peu d'hydrogène à la fois. Ceci est très bien explicité par une expérience de tir au fusil d'assaut sur une bonbonne de gaz naturel, un bidon d'essence et un stock d'hydrures de même contenu énergétique chacun, provoquant respectivement une explosion, un incendie et une petite flamme.
- Possibilité de réduire un tant soit peu le volume de stockage. En effet le rapport des 15.2 m3n stockables aux 91 litres du stock donne une capacité de stockage spécifique de 167 m3n/m3, ce qui est à comparer aux 160 m3n/m3 du stockage gazeux en bouteilles de 50 lit (62 lit brut).
- Réduction d'un facteur deux de l'énergie de compression, l'énergie mécanique utile étant dans le cas du stock d'hydrures de 0.26 MJ/m3n, dans celui des bouteilles de 0.45 MJ/m3n {9}. Le rapport entre les énergies électriques consommées peut être supposé du même ordre de grandeur.

Les désavantages sont certes également multiples:

- Nécessité d'une pureté extrême de l'hydrogène (99,999%) afin de ne pas contaminer l'alliage qui devient sinon inactif. Cette contrainte est à la racine du système de purification présent à la sortie de l'électrolyseur.
- Poids deux fois plus élevé du récipient de stockage. Le total de 235 kg (enceinte et alliage) avancé par Joubert sur les bases de données du fabriquant et du poids spécifique de l'alliage donnent par l'intermédiaire du poids spécifique de l'hydrogène une capacité de stockage massique de 0.54 %, çàd. 5.4 g d'hydrogène par kg de récipient (1.3% en ne prenant en compte que la masse de l'alliage et le volume d'hydrogène qui y est lié). Pour les bouteilles sous pression ce rapport est de 1.16 %.
- Lenteur de la dynamique qui est déterminée par l'échange thermique avec l'environnement.

Evolution dynamique:
Les courbes caractéristiques données plus haut décrivent le comportement à l'équilibre, çàd lorsque la réaction chimique a pris fin et que pression et température ne varient plus dans le temps. Lors du fonctionnement dynamique réel de l'installation les phénomènes sont plus compliqués, ainsi que le montre les mesures en continu (cf. figure 13 et annexe 3). Lors de chacune des compression les 0.59 m3n d'hydrogène injectés font monter la pression à l'intérieur de l'enceinte de quelques 5 à 6 bar, suite à quoi elle retombe exponentiellement de quelques 1 à 2 bar vers sa valeur d'équilibre. Le comportement en température a quant à lui une allure toute différente. La compression induit également une augmentation de la température, mais plutôt que d'être immédiate et suivie d'une relaxation, elle croît de façon exponentielle et n'atteint pas sa valeur d'équilibre avant la prochaine compression. Ceci met en évidence la non-utilisation du circuit de thermalisation, si bien que la chaleur dégagée par la réaction n'est évacuée que très lentement vers l'air ambiant. Il en résulte qu'au lieu de travailler sur une isotherme telle que mesurée par Joubert, le stock fonctionne de façon dynamique et hors équilibre entre deux isothermes, limitant d'autant l'utilisation de la capacité de stockage, si bien que lors d'un beau jour tel le 26 juillet 1996 (cf. figure 13) un premier soutirage a dû être effectué après 2.3 m3n de production déjà.

L'ampleur de ce troncage de capacité dépend du débit et de la durée de soutirage et a donc été particulièrement sévère lors de notre campagne de mesures en continu, où les soutirages se faiaient vers l'atmosphère (pas de résistance) et sur des durées relativement courtes (de l'ordre d'une heure), ne permettant pas d'atteindre l'équilibre thermodynamique. Ainsi la pression d'environ 5 bar obtenue le 26 juillet à la fin du deuxième soutirage remonte pendant la nuit à une valeur d'équilibre de presque 10 bar, soit à plus de la moitié du plateau d'absorption mesuré par Joubert. Le troncage de capacité risque cependant d'être tout aussi important lors du transfert réel vers le stock du véhicule, lors duquel un temps certes très long peut être mis en jeux (toute la nuit par exemple), mais la limitation viendra de la contre-pression du deuxième stock et du phénomène d'hystérèse.

Gestion inefficace du stock:
Une compréhension plus détaillée des phénomènes en jeux nécessiterait des mesures complémentaires et plus précises en ce qui concerne la température, ainsi que l'utilisation d'un modèle mathématique décrivant la dynamique des hydrures, ce qui sort du cadre de cette étude. Il ressort cependant d'ores et déjà de l'analyse des mesures en continu que le stock en question est sinon foncièrement trop faible pour une production d'hydrogène en continu, du moins actuellement insuffisant à cet effet de par la non-utilisation du circuit de thermalisation (qui pourrait être utilisé en circuit fermé avec un réservoir).

ANNEXE 3: MESURES EN CONTINU

Modes de production, gestion du stock:
La campagne de mesure en continu du fonctionnement de l'installation a eu lieu pendant cinq jours de l'été 1996. Au cours de cette campagne rapide, nous avons essentiellement étudié la production d'hydrogène à partir de l'ensemble des deux champs de capteur, mais avons également vérifié le comportement des deux autres modes de production (sur réseau ainsi qu'avec un seul des deux champs). La seule contrainte (ou absence de contrainte) imposée a été un soutirage important du stock d'hydrures chaque fois que celui-ci était plein, correspondant à l'hypothèse de besoins illimités (pas de saturation de la production par manque de soutirage).

Panne de mesure:
Durant les deux premiers et le dernier jour nous avons malheureusement été confronté à une panne de la pince ampèremétrique mesurant le courant photovoltaïque, limitant cette mesure à deux jours.

Typologie des jours de mesure:
Nous donnons ici une description succincte de la particularité de chacun de ces cinq jours.

25 juillet:
Journée marquée par un incident technique lié à la mise en place des mesures, de telle sorte que la production solaire initiée en fin de matinée a très vite été interrompue, pour ne reprendre qu'en toute fin d'après-midi. Entre deux la production sur réseau a été mise en route à deux reprises, afin de tester le système de mesure.

26 juillet:
Journée très claire avec quelques passages nuageux dans l'après-midi. La production importante d'hydrogène a nécessité un premier soutirage du stock en milieu de journée, avant le soutirage de début de soirée.

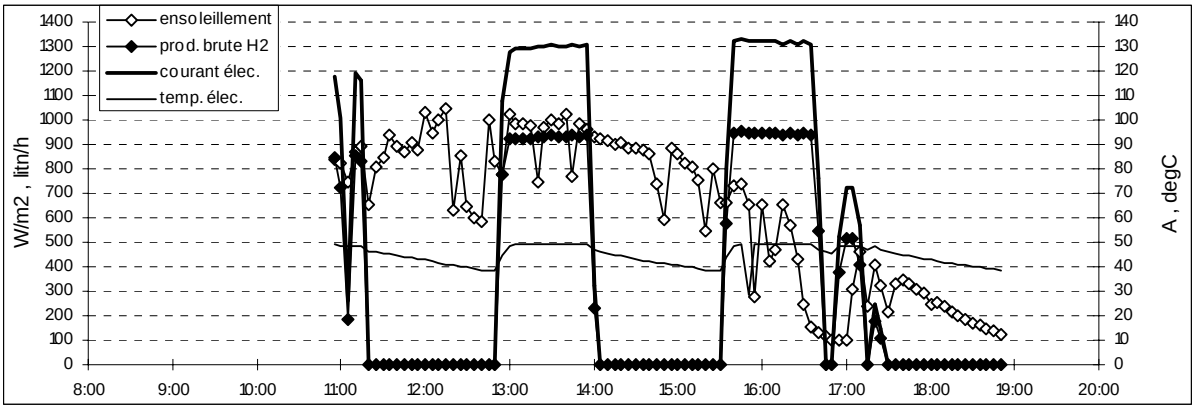
27 juillet:
Journée nuageuse et même couverte en fin de matinée. La production d'hydrogène s'étant interrompue à ce moment pour cause de rayonnement insuffisant, on en a profité pour commuter le champs photovoltaïque sur la recharge des accumulateurs. Le retour du soleil pendant le repas de midi n'a ainsi à nouveau pu être utilisé pour la production d'hydrogène qu'à partir du retour en début d'après-midi au mode d'utilisation qui nous intéresse ici. La faible quantité d'hydrogène produite ce jour-ci n'a pas nécessité de soutirage du stock.

28 juillet:
Journée nuageuse et couverte, sauf en fin de matinée. Ce jour est caractérisé par un enclenchement/déclenchement fréquent de l'électrolyseur. Un soutirage relativement faible a eu lieu en milieu de journée, avant le soutirage plus complet de début de soirée.

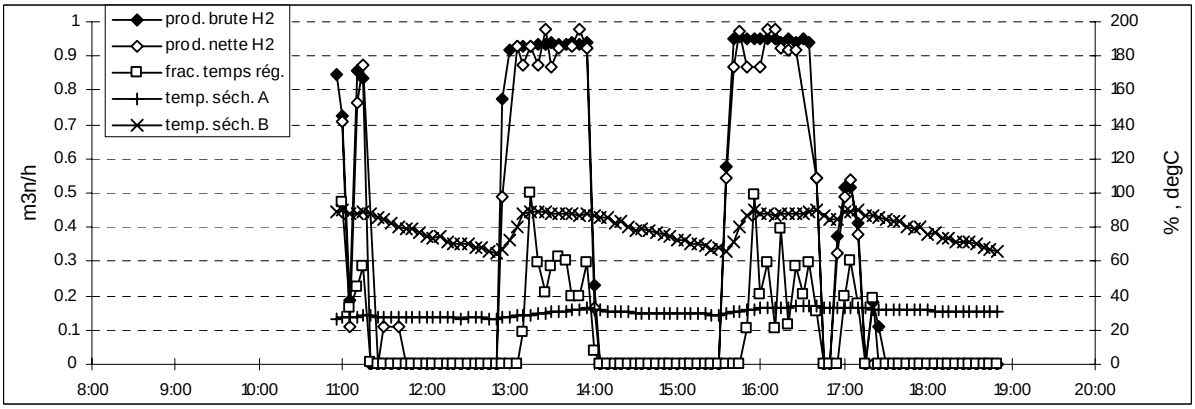
29 juillet:
Journée très claire, utilisée cette fois-ci pour tester la production d'hydrogène avec un seul des deux modules photovoltaïques, l'autre étant utilisé pour injection dans le réseau. Brèves interruptions manuelles de la production vers 15:00 et 16:00 pour cause de problème temporaire d'acquisition de mesure. Vers 16:30, lorsque l'ensoleillement faiblissant interrompt la production, utilisation en parallèle des deux modules photovoltaïques pour continuer la production jusqu'au coucher du soleil. Cette journée a par ailleurs été utilisée pour tester le fonctionnement de l'installation en processus de bourrage du stock. On observe ainsi en fin de journée les compressions de plus en plus rapprochées et faibles, à concurrence chaque fois de la pression maximale du stock, qui se relâche quelque peu entre deux.

Représentation graphique:
Suivent pour chacun de ces jours une page qui retrace graphiquement l'évolution dynamique de l'installation, par regroupement des mesures propres à chaque composant. Les quatre graphiques qui en résultent ont été explicités dans la première partie (figures 10 à 13).

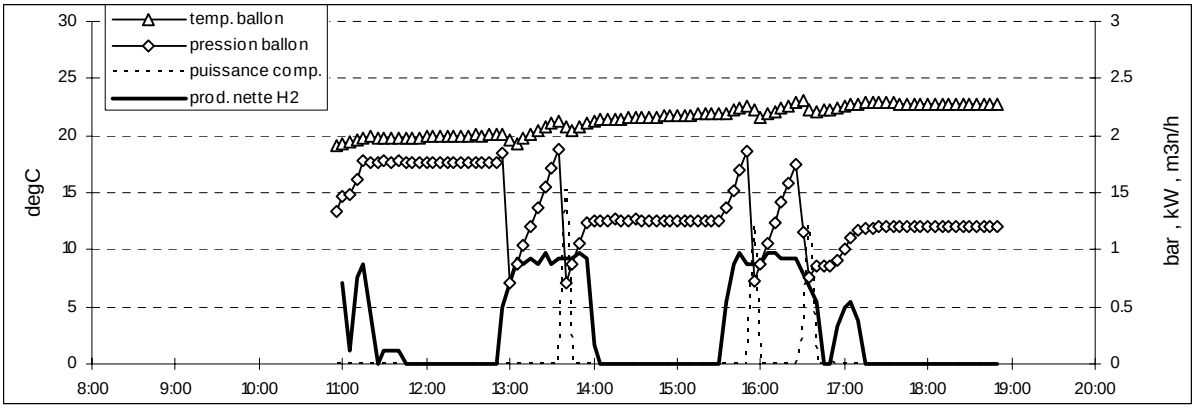
a) production



b) purification



c) stockage intermédiaire



d) stockage final

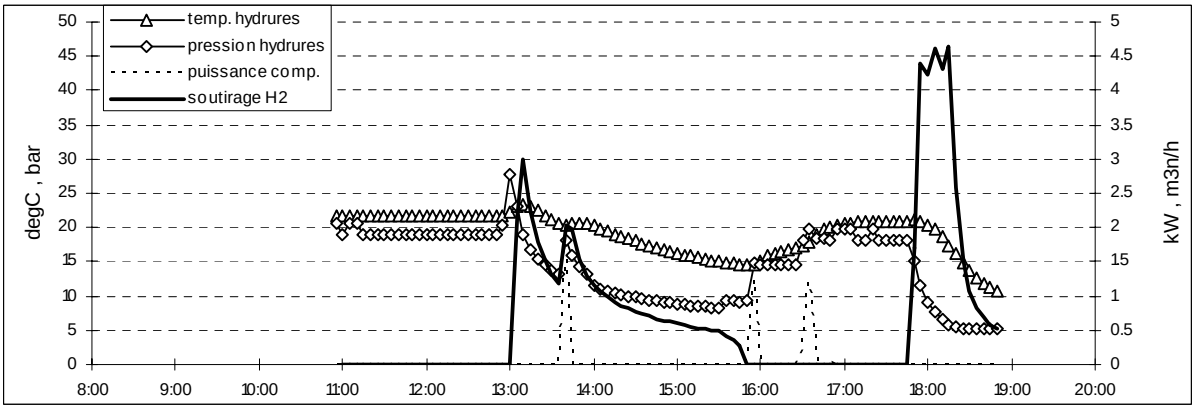
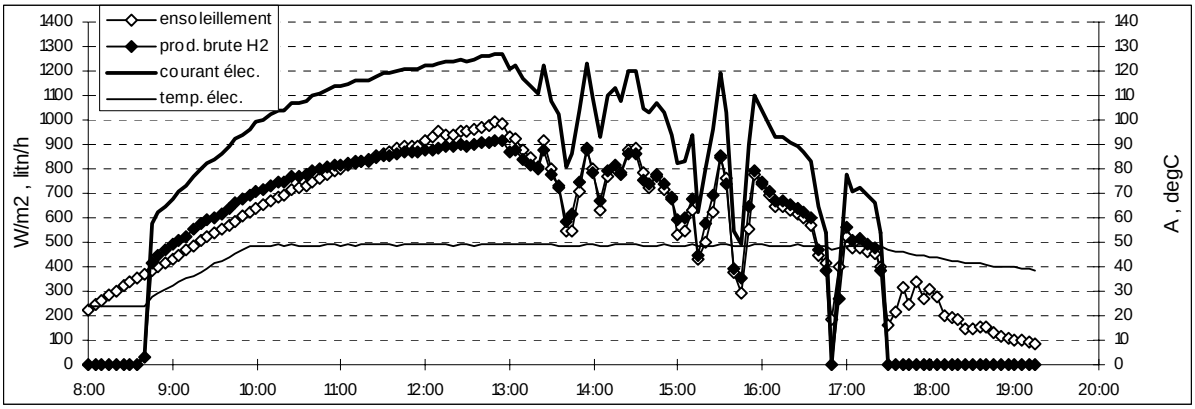
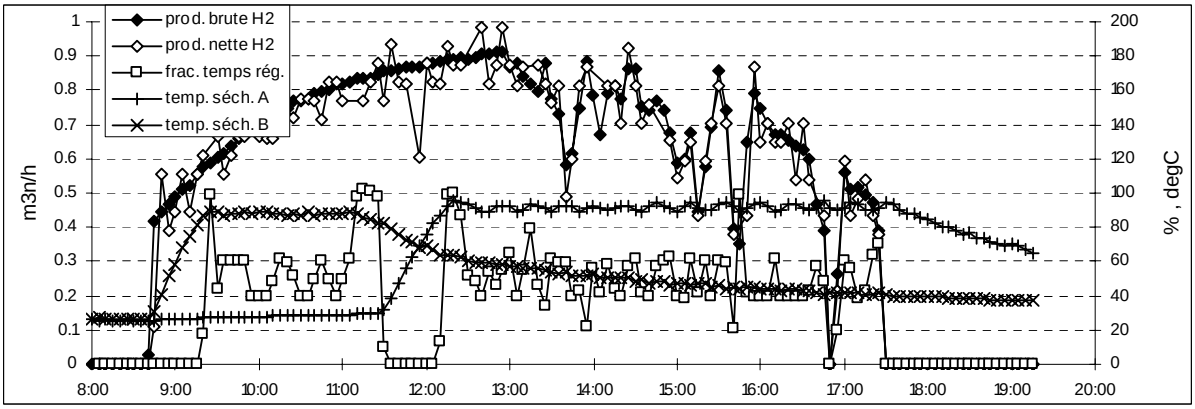


Figure 42: *Mesures en continu du 25 juillet 1996*.

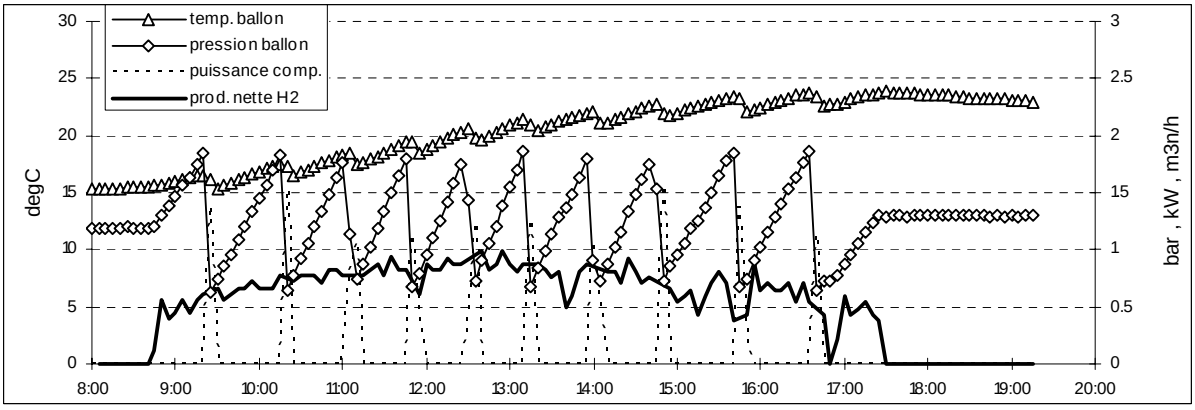
a) production



b) purification



c) stockage intermédiaire



d) stockage final

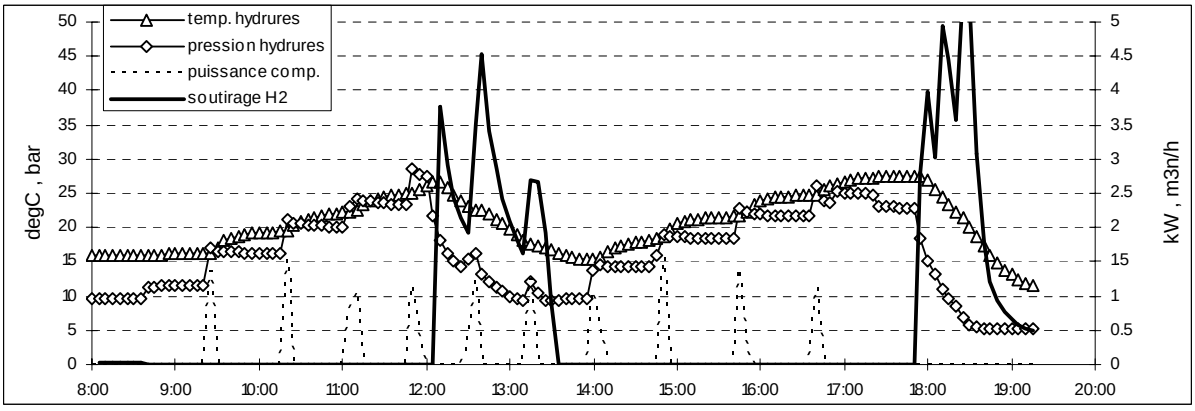
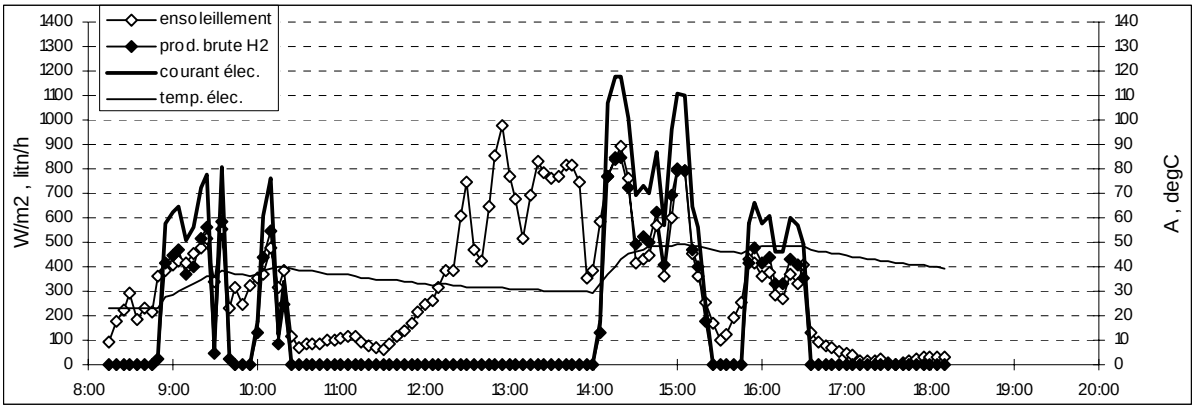
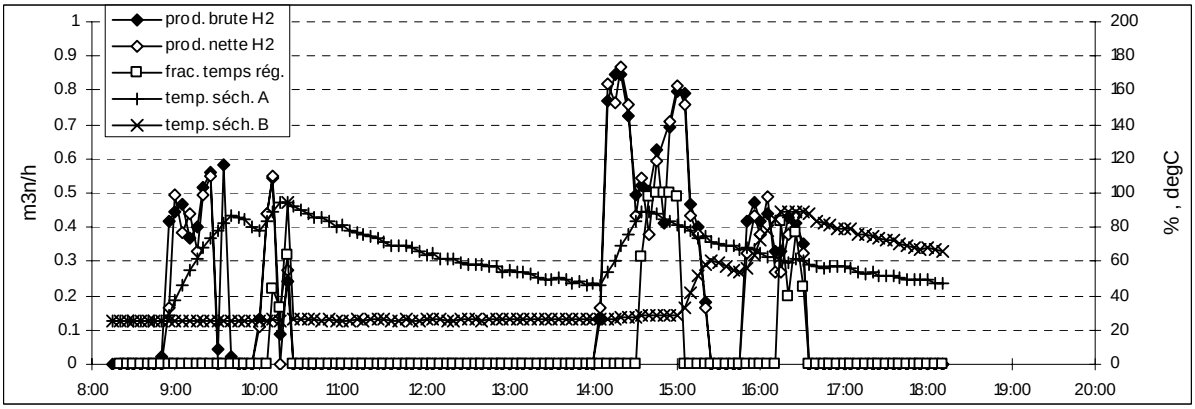


Figure 43: *Mesures en continu du 26 juillet 1996*.

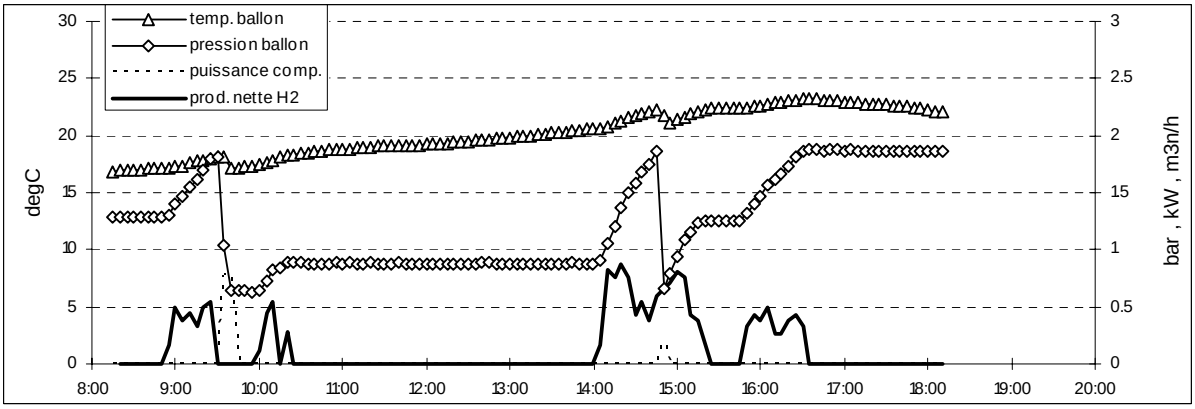
a) production



b) purification



c) stockage intermédiaire



d) stockage final

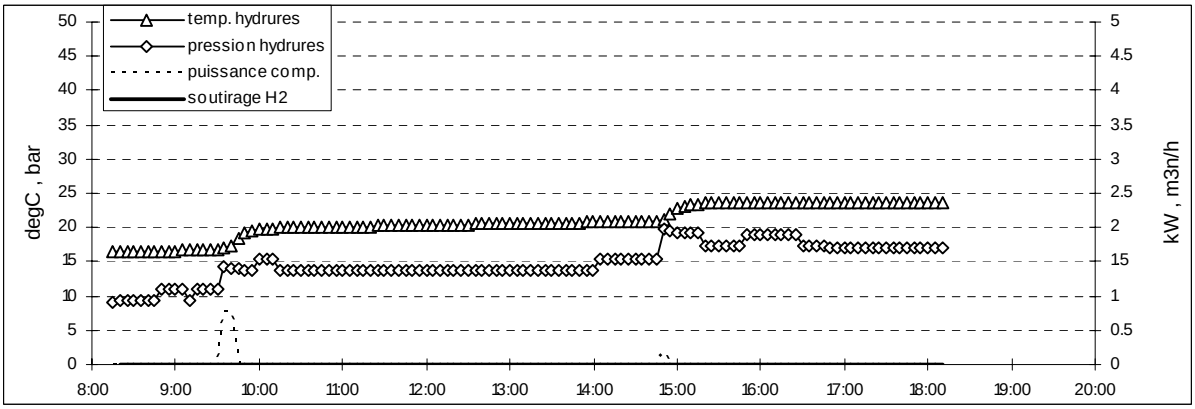
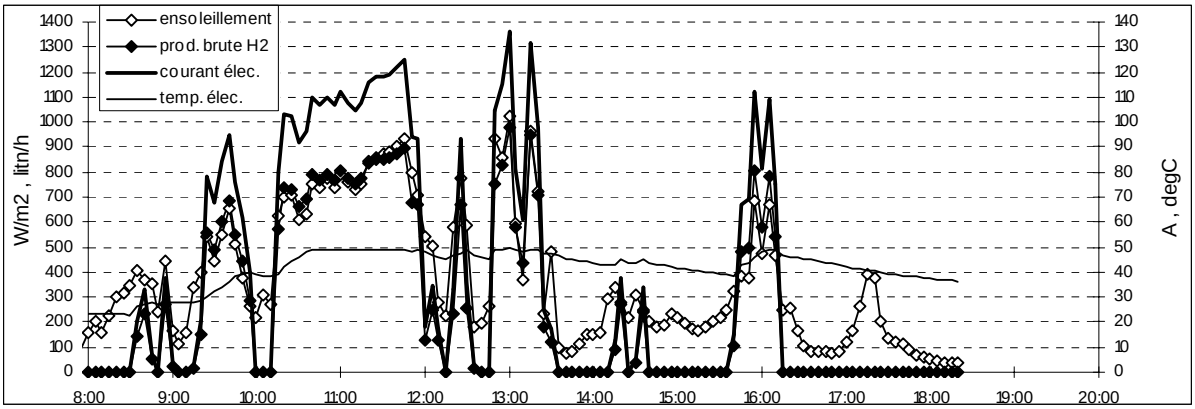
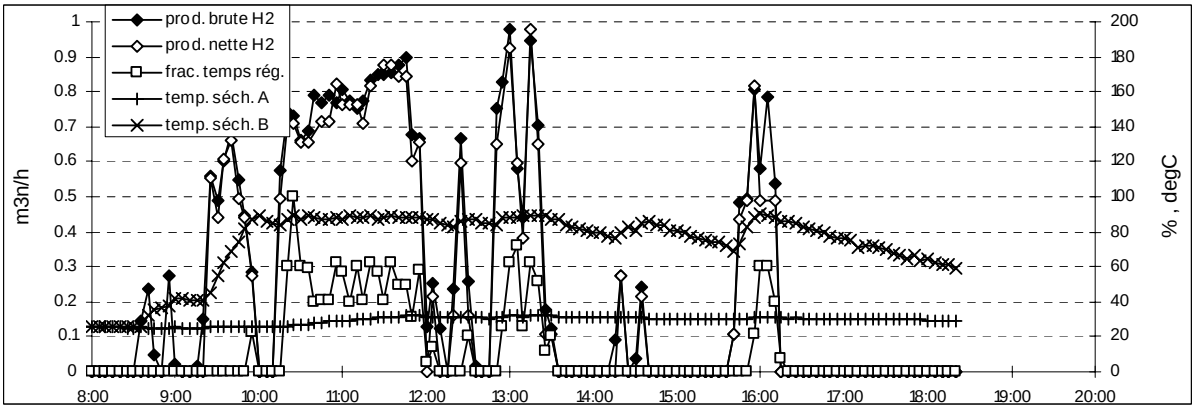


Figure 44: *Mesures en continu du 27 juillet 1996*.

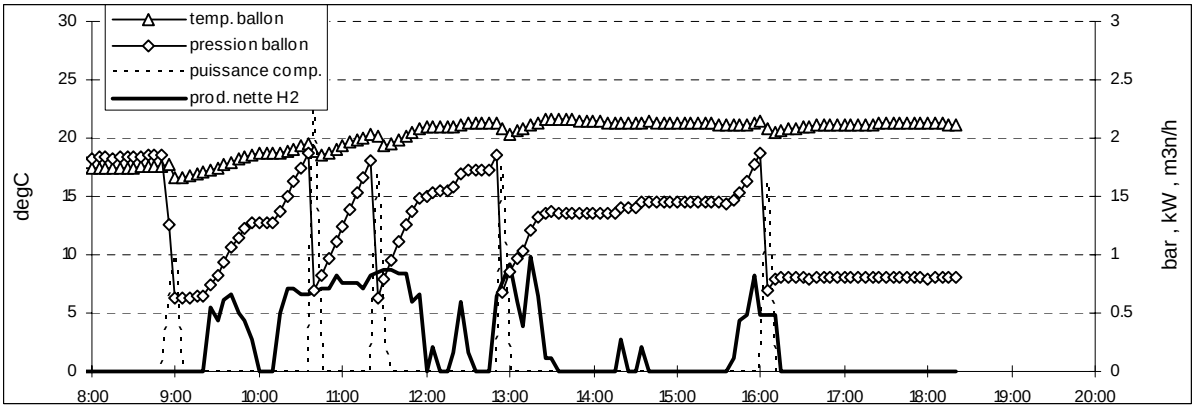
a) production



b) purification



c) stockage intermédiaire



d) stockage final

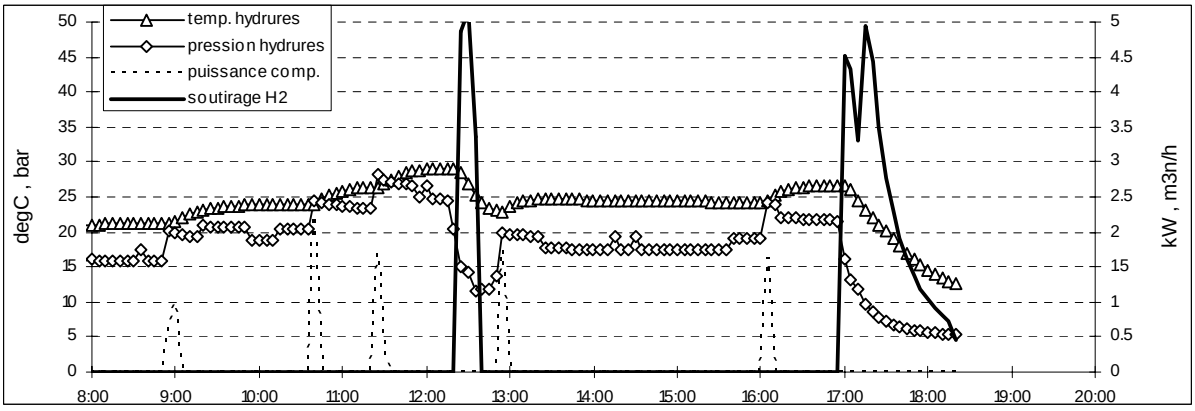
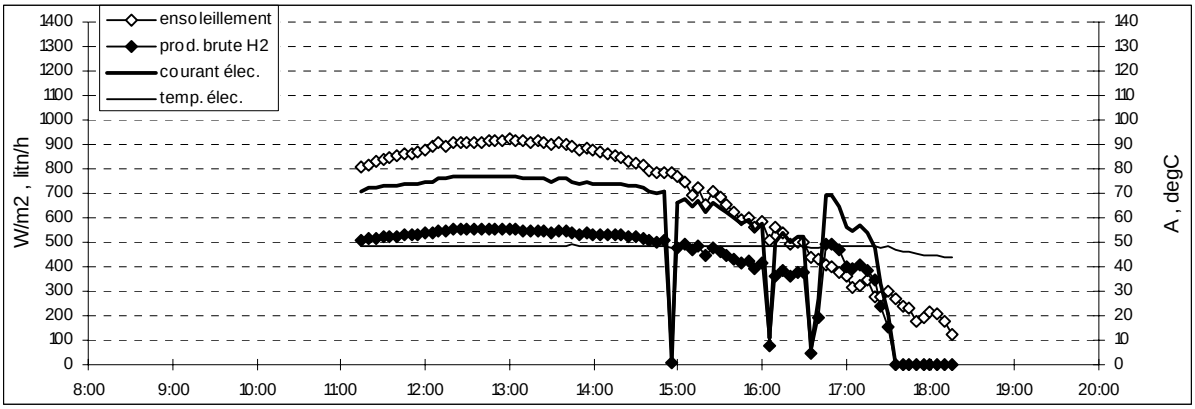
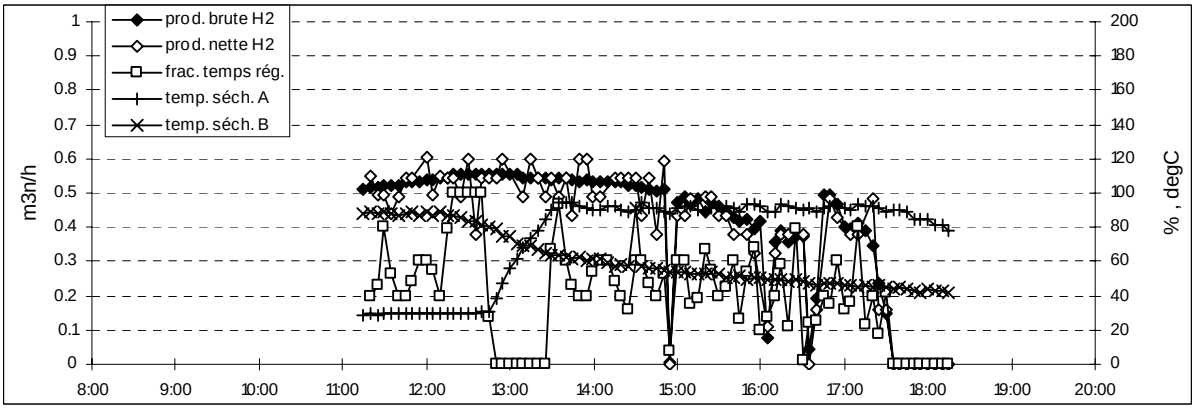


Figure 45: *Mesures en continu du 28 juillet 1996*.

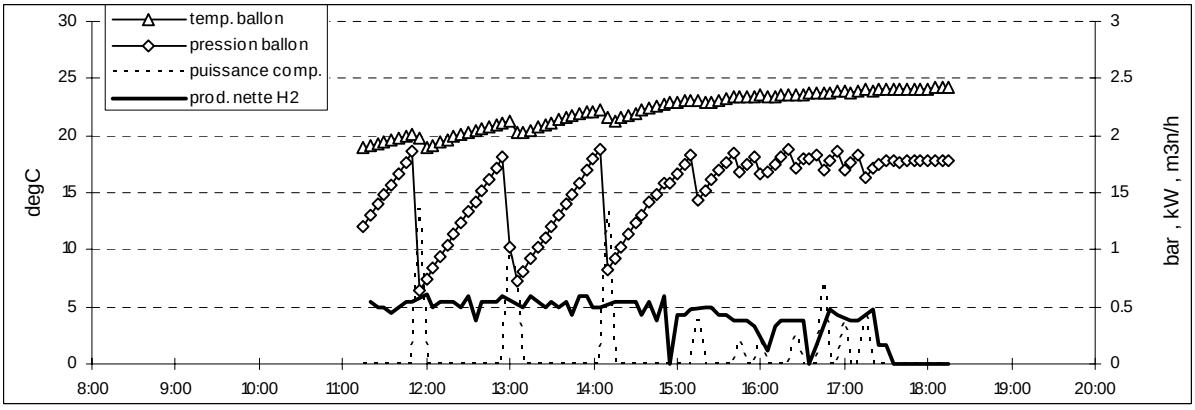
a) production



b) purification



c) stockage intermédiaire



d) stockage final

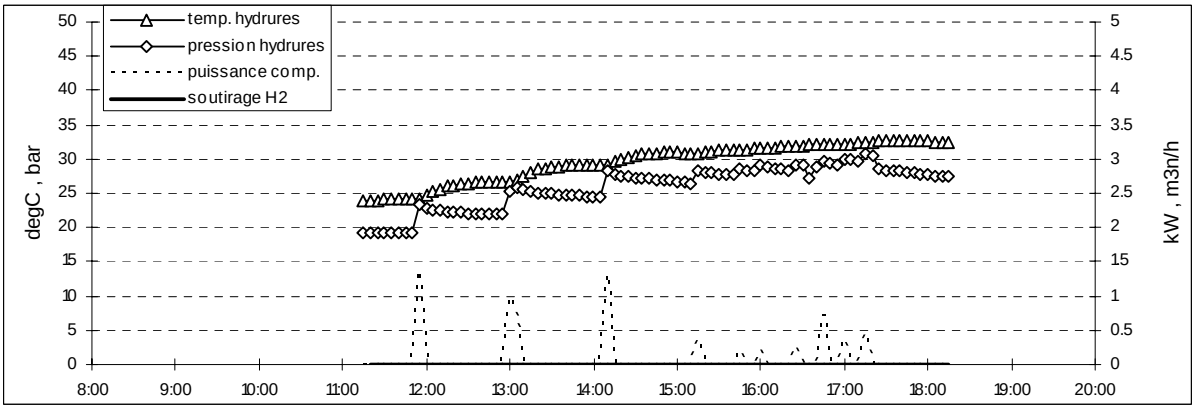


Figure 46: *Mesures en continu du 29 juillet 1996*.

NOTES

{1} Il s'agit là d'un calcul rudimentaire basé sur une étude de production potentielle d'huile de colza en Suisse, utilisable comme carburant dans des moteurs à combustion. Selon une communication présentée dans le cadre de séminaires organisés par notre Centre [9], le bilan énergétique d'un tel procédé (valeur énergétique contenue dans l'huile, dont on a retranché l'énergie nécessaire à la production), s'élève à environ 1,4 MJ par an et m2 de plantation. En divisant ce chiffre par les 4000 MJ/m2/an d'ensoleillement on obtient une efficacité de captage de 0,035% du rayonnement solaire.

Un calcul similaire peut se faire sur la base des données relatives à la gestion du bois en Suisse, selon des valeurs que nous avons obtenue au secrétariat de la Conférence Suisse du Bois, à Bienne. Ainsi le potentiel de production renouvelable de bois de nos forêts se situerait si elles étaient bien entretenues aux alentour de 6 à 7 million de m3 par année (contre une production actuelle de 3 à 4 million de m3). Réparti sur les 1,1 million d'hectares de forêt, cela représente environ 6 m3 par hectare et par an, ou encore, en considérant une valeur énergétique moyenne du bois de 9 GJ/m3, une production de 54 GJ par hectare et par an (5,4 MJ/m2/an). Ramené ici aussi aux 4000 MJ/m2/an d'ensoleillement, on a cette fois-ci une efficacité de captage de 0,13% du rayonnement solaire (dans lequel n'est ici pas tenu compte de l'énergie nécessaire à l'exploitation).

{2} Soient

P_{pv} : puissance photovoltaïque développée par le champs [W]
G_{inc} : rayonnement solaire global sur plan capteur [W/m^2]
S_{pv} : surface brute du champs photovoltaïque: 65.2 [m2]

La dépendance de P_{pv} en fonction de G_{inc} peut être décrite par une relation quadratique de la forme:

$$P_{pv} = A_{pv1}\, G_{inc} - A_{pv2}\, G_{inc}^{\,2}$$

Il en découle une efficacité de captage $\eta_{pv} = (P_{pv}/S_{pv})/G_{inc}$ qui dépend linéairement de l'ensoleillement:

$$\eta pv = \eta_{pv0} - \eta_{pv1}\, Ginc$$

où: $\eta_{pv0} = A_1 / S_{pv}$
$\eta_{pv1} = A_2 / S_{pv}$

{3} Soient

I : le courant électrique produisant l'électrolyse [A]
$Dmol_e$: le débit molaire d'électron portés par le courant I [mol/s]
$Dmol_{H2}$: le débit molaire d'hydrogène, par cellule traversée par I [mol/s/cell]
Ro_{H2} : la densité de l'hydrogène [g/m3]
M_{H2} : la masse molaire de l'hydrogène [g/mol]
D_{H2} : le débit d'hydrogène par cellule [litn/h/cell]

L'électrolyse consiste, à la cathode, de la formation de deux molécules d'hydrogène H_2 et de quatre ions OH^- à partir de la recombinaison de quatre électrons formant le courant électrique avec quatre molécules d'eau. Les ions OH^- portent à leur tour le courant électrique dans l'électrolyte et se combinent à nouveau à l'anode en une molécule d'oxygène O_2, deux molécules d'eau et quatre électrons qui, lors d'un branchement en série transportent le courant à la prochaine cellule:

à la cathode: $4H_2O + 4e^- \rightarrow 2H_2 + 4OH^-$
à l'anode : $4OH^- \rightarrow O_2 + 2H_2O + 4e^-$

D'où le bilan global

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$$

Il en découle que le débit molaire du flux électronique est le double du débit molaire d'hydrogène par cellule:

$$\begin{aligned} Dmol_e &= 2Dmol_{H2} \\ &= 2D_{H2}\, Ro_{H2} / M_{H2} \end{aligned}$$

Or le courant I est constitué du débit molaire $Dmol_e$ portant une charge $N_A q_e$:

$$\begin{aligned} I &= Dmol_e N_A q_e \\ &= 2D_{H2} Ro_{H2} N_A q_e / M_{H2} \end{aligned}$$

On en déduit le rapport α_{ID} suivant entre débit d'hydrogène (par cellule) et courant d'électrolyse:

$$\alpha_{ID} = M_{H2} / 2N_a q_e Ro_{H2}$$

En conditions normales de pression et température (cf. constantes physiques), ce rapport vaut

$$\alpha_{ID} = 0.44901 \text{ [(litn/h/cell)/A]}$$

{4} La tension (par cellule) u nécessaire à la dissociation de l'eau se décompose en quatre termes:

- la tension minimale de dissociation u_0.
- la somme des surtensions anodiques et cathodiques, qui se forme exponentiellement avec le courant pour tendre à une valeur u_{ac}.
- la tension nécessaire à combler les pertes ohmiques, soit proportionnelle d'un facteur ρ (résistance spécifique) à la densité de courant j.

càd:

$$u = u_0 + u_{ac}(1-\exp(-j/j_0)) + \rho j$$

Afin de pouvoir déterminer les coefficients u_0, u_{ac}, j_0 et ρ nous écrivons cette relation sous la forme

$$u = u_0'(1 - \alpha \exp(-j/j_0)) + \rho j$$

avec

$$u_0' = u_0 + u_{ac}$$

$$\alpha = u_{ac} / (u_0 + u_{ac})$$

Pour des courants importants cette relation devient linéaire:

$$u \sim u_0' + \rho j \qquad (\text{lorsque } j >> j_0),$$

ce qui nous permet d'obtenir les coefficients u_0' et ρ par régression linéaire sur les mesures telles que $j \geq j_{min}$, où, d'après l'allure générale de la caractéristique (figure 32) nous avons fixé j_{min} à 0.15 A/cm2, correspondant à un courant total de 90 A. La relation

$$\ln(1-(u-\rho j)/uo') = \ln(\alpha) - j/j_0$$

permet alors une seconde régression linéaire sur les mesures telles que $j < j_{min}$, afin d'obtenir cette fois-ci les coefficients α et j_0. La définition de α et u_0' ci dessus permet de recalculer u_0 et u_{ac}.

Ces régressions, pour chacune des isothermes, donnent les valeurs suivantes:

Température °C	**ρ** Ohm*cm2 /cell	**u_o'** V/cell	**j_o** A/cm2	**α** -	**u_0** V/cell	**u_{ac}** V/cell
35.7 +/- 0.7	1.63	1.81	$3.8\ 10^{-2}$	0.12	1.59	0.218
40.2 +/- 0.5	1.36	1.83	$4.7\ 10^{-2}$	0.13	1.60	0.230
45.2 +/- 0.4	1.35	1.80	$5.0\ 10^{-2}$	0.11	1.61	0.190
50.2 +/- 0.2	1.40	1.77	$3.3\ 10^{-2}$	0.13	1.53	0.228

Ramenées aux 16 cellules de 600 cm^2 de surface chacune, ces valeurs donnent:

Température °C	**R** Ohm	**U_o'** V	**I_o** A	**α** -	**U_0** V	**U_{ac}** V
35.7 +/- 0.7	$4.34\ 10^{-2}$	28.9	22.6	0.12	25.4	3.49
40.2 +/- 0.5	$3.62\ 10^{-2}$	29.2	28.2	0.13	25.6	3.68
45.2 +/- 0.4	$3.60\ 10^{-2}$	28.8	30.2	0.11	25.8	3.04
50.2 +/- 0.2	$3.73\ 10^{-2}$	28.2	19.7	0.13	24.5	3.65

La tension minimale d'électrolyse u_0 se trouve donc être de 3.2 à 10 % supérieure à la tension théorique minimale, qui est ici la tension supérieure de dissociation (u_{sup} =1.48 V/cell, cf. constantes physiques) puisque l'électrolyse a lieu avec de l'eau liquide. Cet écart est tout à fait comparable aux valeurs observées de par ailleurs [6,7].

L'efficacité énergétique η est définie comme le rapport entre puissance totale et puissance utile, soit entre tension totale et tension utile. L'utilisation finale de l'hydrogène étant faite dans un moteur à combustion c'est la tension inférieure de dissociation (u_{inf} =1.25 V/cell, cf. constantes physiques) qui entre ici en ligne de compte:

$$\eta = u_{inf} / (u_0 + u_{ac}(1-\exp(-j/j_0)) + \rho j)$$

Lors d'un bilan énergétique global de l'installation ce n'est cependant pas le courant, mais la puissance totale fournie par le transformateur DC/DC qui sert de donnée de calcul. La combinaison des composantes linéaire et exponentielle de la relation courant/tension ne permet pas d'exprimer ce dernier de façon explicite en fonction de la puissance. Les valeurs de I_o étant inférieures au courant d'enclenchement de l'électrolyseur on peut utiliser les relations linéaires respectivement quadratiques suivantes:

$U = U_o' + RI$ pour I > 45 A
$P = U_o' I + RI^2$ pour I > 45 A

On en déduit le courant d'électrolyse et l'efficacité des 16 cellules en fonction de la puissance utilisée:

$I = ((U_0'^2 + 4RP)^{1/2} - U_0') / 2R$ pour P > 1400 W
$\eta = U_{inf} / U_o' * 2 / (1+(1+4RP/U_o'^2))^{1/2}$ pour P > 1400 W, avec U_{inf} = 16 *1.25 V

{5} Soient

$Dmol_{H2}$: le débit molaire d'hydrogène [mol/s]
Ro_{H2} : la densité de l'hydrogène [g/m3]
M_{H2} : la masse molaire de l'hydrogène [g/mol]
D_{H2} : le débit d'hydrogène [litn/h]
$Dmol_{H2O}$: le débit molaire d'eau dissociée [mol/s]
Ro_{H2O} : la densité de l'eau [g/m3]
M_{H2O} : la masse molaire de l'eau [g/mol]
D_{H2O} : le débit d'eau dissocié [lit/h]

Le nombre de môles d'eau dissociée et d'hydrogène produit sont égal {3}:

$Dmol_{H2} = Dmol_{H2O}$

$$D_{H2}\, Ro_{H2} / M_{H2} = D_{H2O}\, Ro_{H2O} / M_{H2O}$$

d'où le rapport suivant entre débits:

$$D_{H2O} = D_{H2}\,(Ro_{H2} / M_{H2})/(Ro_{H2O} / M_{H2O})$$

{6} A une production de 1m3n/h correspond un courant d'environ 140 A, provoquant des pertes ohmiques P_{ohm} de 730 W, selon la régression statistique à température de consigne de 45°C {4}. En admettant que ces pertes soient entièrement absorbées par le débit de refroidissement D_{H2O}, son échauffement ΔT_{H2O} est donné par le bilan thermique suivant:

$$\Delta T_{H2O} = P_{ohm} / Cp_{H2O}\, Ro_{H2O}\, D_{H2O}$$

où Cp_{H2O} est la chaleur spécifique et Ro_{H2O} la masse volumique de l'eau. Cet échauffement est limité par la température de consigne de l'électrolyseur de 50°C ainsi que la température estivale maximale du réseau de 15°C, soit un échauffement maximal ΔT_{H2O}^{max} de 35 K. On en déduit le débit minimum D_{H2O}^{min} suivant:

$$D_{H2O}^{min} \geq P_{ohm} / Cp_{H2O}\, Ro_{H2O}\, \Delta T_{H2O}^{max}$$
$$\geq 18 \text{ lit/h}$$

{7} Soient

V	: le volume du ballon
Δn	: l'accroissement molaire lors du remplissage [mol]
Δp	: l'accroissement de pression lors du remplissage
ΔV_n	: le volume normal de l'accroissement [m3n]
T_n, p_n	: température et pression normales
	: 293 [K], 1 [bar]

Accroissement de volume normal et accroissement molaire sont reliés par l'équation des gaz parfaits:

$$\Delta V_n = \Delta n R T_n / p_n$$

Il en va de même pour accroissement de pression et accroissement molaire:

$$\Delta p = \Delta n R T / V$$

On en déduit la relation suivante entre accroissement de pression et accroissement de volume normal:

$$\Delta V_n = \Delta p\, V T_n / T p_n$$

ou encore en admettant un fonctionnement à température normale:

$$\Delta V_n = \Delta p\, V / p_n$$

ce qui permet de mesurer le débit d'hydrogène entrant dans le ballon par différentielle de pression. Pour ce faire il faut d'abord avoir calibré le volume du ballon, ce qui se fait par injection d'hydrogène via un débitmètre, en utilisant la relation sous sa forme suivante:

$$V = \Delta V_n\, T p_n / T_n \Delta p$$

{8} La puissance moyenne P_{moy} de maintient de la température de consigne (60 W) est la pondération de la puissance de chauffage P (200 W) par la fraction de temps de chauffage effectif au cours de la phase de maintient de la consigne T_{con} de 85°C, en mode de production continue, pour une température ambiante T_{air} de 20°C. Cette puissance permet d'identifier le paramètre k de pertes thermiques d'une colonne (k=0.9 W/K), défini par

$$P_{moy} = k\, \Delta T$$

Une mesure de montée en température T (qui dure 45 minutes pour une élévation de 20 à 85°C) permet quant à elles d'identifier le paramètre c de capacité calorifique, par simple résolution du modèle à un noeud:

$$cdT/dt = P - k(T-Tair)$$

et régression linéaire sur sa solution:

$$T(t) = T_{air} + P/k(1 - \exp(-kt/c))$$

{9} L'énergie utile de compression (çàd l'énergie mécanique de compression isotherme E_{mec}) pour passer d'une pression p_1 à une pression p_2 s'obtient par substitution de l'équation des gaz parfaits dans l'intégrale du travail:

$$E_{mec} = -\int p\, dV$$

ce qui donne

$$E_{mec} = nRT \ln(V_1/V_2)$$

où V_1 et V_2 sont les volumes occupés avant et après la compression par les n moles de gaz. Toujours par l'équation des gaz parfaits le rapport de ces volumes est inversément proportionel au rapport des pressions, ce qui donne:

$$E_{mec} = nRT \ln(p_2/p_1)$$

Pour une compression de 1.3 bar (surpression moyenne dans le ballon) vers un maximum de 29 bar (surpression maximum dans le stock d'hydrures métalliques) l'énergie utile est ainsi à température normale de 0.26 MJ/m3n. Pour une compression en bouteilles (surpression de 200 bar) elle serait de 0.45 MJ/m3n.

{10} Cette valeur diffère très légèrement de celle obtenue par les gaz parfaits:

$$Ro_{H2} = p_n M_{H2}/RT_n = 83.81 \text{ g/m3}$$

{11} Le contenu massique s'obtient par division du contenu volumique par la densité Ro_{H2}; le contenu molaire s'obtient par multiplication du contenu massique par la masse molaire M_{H2}.

{12} La tension de dissociation s'obtient par division de l'énergie de dissociation (=contenu énergétique) par la charge dissociée, qui est de deux charges élémentaires par atomes d'hydrogène:

$$U^{sup}_{H2} = Q^{sup}_{H2} / 2N_a q_e$$
$$U^{inf}_{H2} = Q^{inf}_{H2} / 2N_a q_e$$

BIBLIOGRAPHIE

[1] Solar-Wasserstoffanlage Friedli Zollbrück, M. Aemmer, Ingenieurschule Biel, Fachgruppe für Energietechnik, Schlussbericht (EF-P-D(91)0112), 1993.
[2] Mesure de caractéristique d'un container de stockage d'hydrogène à hydrure métallique, J.-M. Joubert et al., Laboratoire de Cristallographie, Université de Genève, 1996.
[3] Friedli-Info no 2, Matthias Stadelmann, Markus Friedli AG, décembre 1991.
[4] PVSYST, logiciel pour système photovoltaïque, A. Mermoud, GAP, Université de Genève, 1996.
[5] Météonorm, J. Remund et al., Office fédéral de l'énergie, 1995.
[6] Hydrogen as an Energy Carrier, C.-J. Winter & J. Nitsch, Springer-Verlag, 1988.
[7] Solar-Hydrogen Energy Systems, T. Ohta, Pergamon Press, 1979.
[8] Performances de deux installations photovoltaïques, Thèse, P. Schaub, GAP, Université de Genève, 1993.
[9] L'agriculture pécheresse?, Séminaire CUEPE énergie et environnement, A. Reist, Station fédérale de recherches agronomiques de Changins, 1990 (non publié mais disponible au Centre d'étude des problèmes de l'énergie, Université de Genève).

CONSTANTES PHYSIQUES, FACTEURS DE CONVERSION ET DÉFINITIONS D'UNITÉ

Tout au long de cette étude, ainsi que dans la liste de constantes qui suit, la notation m3n et litn fait référence au mètre cube respectivement litre d'hydrogène normal, càd à condition de température et pression normale.

Les définitions et constantes suivantes ont été utilisées:

Conditions normales:				
Température normale	T_n	20	°C	
		293.15	K	
Pression normale	P_n	1	atm	
		101.325	Pa	
Constantes générales:				
Nombre d'Avogadro	N_A	$6.0225\ 10^{23}$	1/mol	
Constante des gaz parfaits	R	8.3143	J/mol K	
Charge élémentaire	q_e	$1.6021\ 10^{-19}$	C	
Propriétés de l'hydrogène à conditions normales:				
Masse moléculaire de l'hydrogène	M_{H2}	2.016	g/mol	[4]
Masse volumique de l'hydrogène	Ro_{H2}	83.76	g/m3n	[4], {10}
Chaleur spécifique de l'hydrogène	Cp_{H2}	14.89	J/g/K	[4]
Contenu énergétique supérieur de l'hydrogène	$Qvol^{sup}_{H2}$	11.883	MJ/m3n	[4]
		3.3008	kWh/m3n	
	$Qmas^{sup}_{H2}$	141.87	kJ/g	{11}
	$Qmol^{sup}_{H2}$	286.01	kJ/mol	{11}
Contenu énergétique inférieur de l'hydrogène	$Qvol^{inf}_{H2}$	10.046	MJ/m3n	[4]
		2.7906	kWh/m3n	
	$Qvol^{inf}_{H2}$	119.94	kJ/g	{11}
	$Qvol^{inf}_{H2}$	241.795	kJ/mol	{11}
Tension supérieure de dissociation de l'eau	U^{sup}_{H2}	1.4821	V/cell	{12}
Tension inférieure de dissociation de l'eau	U^{inf}_{H2}	1.2530	V/cell	{12}
Rapport débit/courant d'électrolyse	α_{ID}	0.44901	(litn/h/cell)/A	{2}
Propriétés de l'eau à conditions normales:				
Masse moléculaire de l'eau	M_{H2O}	18.015	g/mol	
Masse volumique de l'eau	Ro_{H2O}	998.20	kg/m3	
Chaleur spécifique de l'eau	Cp_{H2O}	4180	J/kg/K	

Tout au long de ce travail, outre les unités communes, les abréviations suivantes sont par ailleurs utilisées:

- m3n, litn: mètre cube, respectivement litre à conditions normales de pression et température (1 atm, 20°C). Il s'agit là de mesures de quantité de gaz, et non de volume, qui lui dépend de la pression et température actuelles du gaz.
- cell: unité d'un ensemble de cellules d'électrolyse branchés en série.