

Le stockage d'électricité



Par Jacques Audergon, ing dipl EPFL/SIA



- Pourquoi stocker l'électricité ?**
- Quelles sont les principales formes de stockage de l'électricité ?**
- Application 1 : stockage par batteries**
- Application 2 : stockage sous forme de gaz synthétique (Power-to-gas)**
- Application 3 : stockage sous forme d'acide formique**
- Perspectives et idées**



1. Pourquoi stocker l'électricité ?



Pourquoi stocker l'électricité ?

- Le développement croissant de la production d'électricité renouvelable, décentralisée et intermittente rend plus difficile la gestion des réseaux. Stocker l'électricité a un rôle essentiel dans la stabilisation des réseaux**
- Pour un auto-producteur d'électricité renouvelable, pouvoir stocker cette électricité lui permet d'accroître son auto-consommation, tirer un meilleur parti financier de ses achats d'électricité réseau et augmente sa sécurité.**

Intérêt du stockage :

Niveau gestionnaire de réseau :

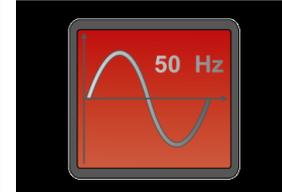
Régulation du réseau



Ecrêtage de pic



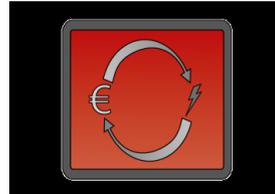
Régulation de fréquence



Réduction des infras

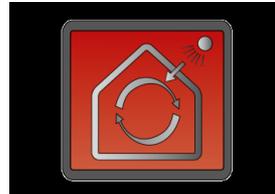


Négoce d'énergie



Niveau industriel :

Augmentation autoconsommation



Déplacement des pics de consommation



Ecrêtage de pic



Alimentation sans interruption



Niveau domestique :

Augmentation autoconsommation



Déplacement des pics de consommation autoconsommation



Alimentation sans interruption



Site isolé





2. Principales formes de stockage



Formes et caractéristiques générales de stockage :

Plusieurs formes de stockage :

- F1 Stockage indirect de l'électricité**
- F2 Stockage direct de l'électricité**

Capacité et durée variable selon type de stockage

- D1 Journalier permettant de lisser Production/demande**
- D2 Hebdomadaire voire saisonnier**
- D3 Annuel**



Stockage indirect :

Stockage de chaleur ou de froid

permet de déphaser la demande en électricité pour les processus de production de chaud ou de froid

Utilisation de l'inertie des bâtiments

par une gestion anticipée des conditions climatiques (prédictive)
déplacement de la demande = quasi stockage à court terme

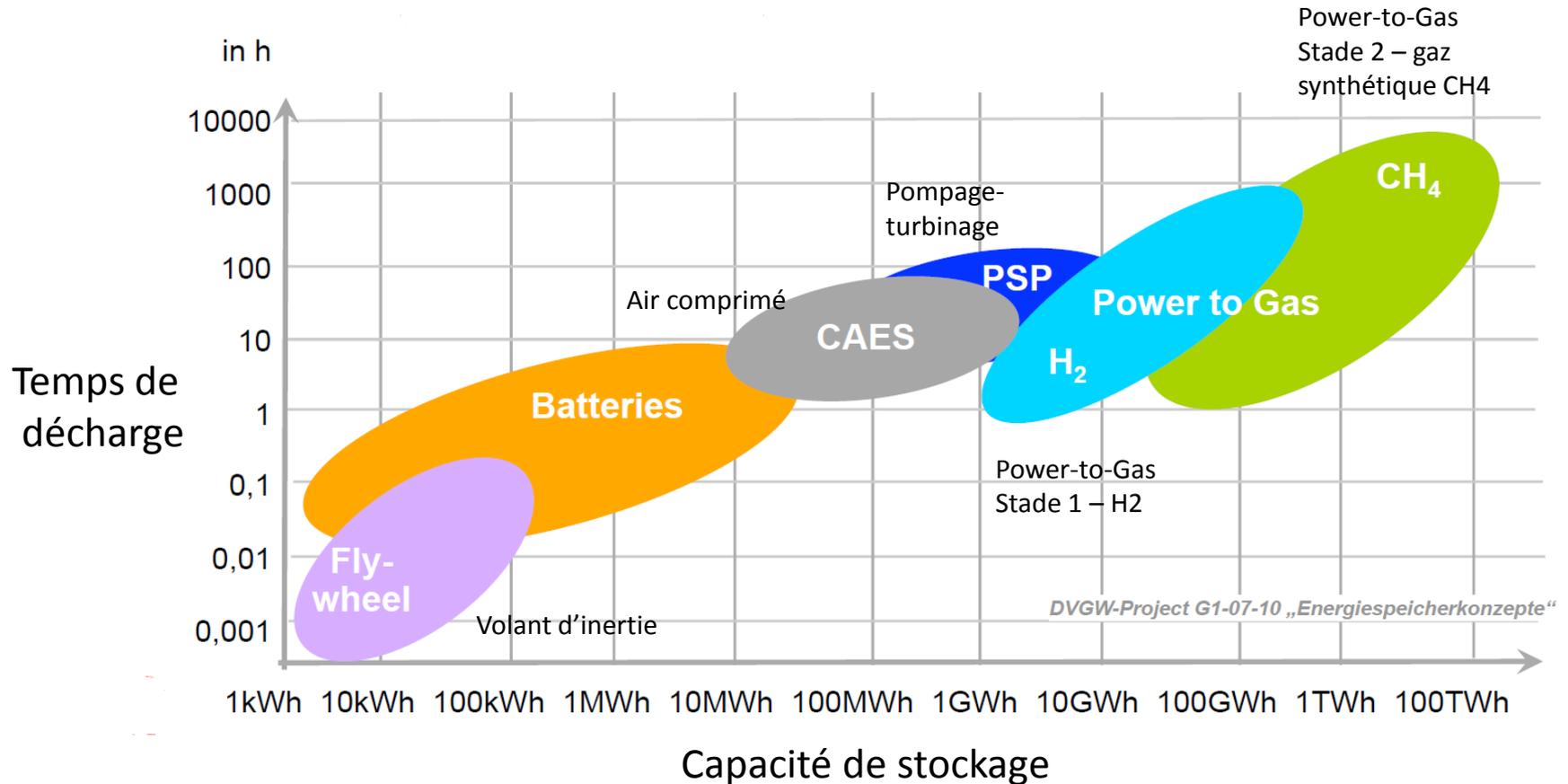
Combinaison des systèmes de gestion

gestion prédictive de la demande en chaleur ou froid en utilisant l'inertie des systèmes combinée avec des stockages et gestion optimisée des prestations des différents appareils électriques du ménage/bureau

Stockage direct : capacité spécifique par kg de stock

Type de stockage	Par kg	Par litre	Remarques
	MJ/kg	MJ/L	
Unité : 1 MJ = 278 Wh			
Air comprimé	0,5	0,16	P = 300 bar
Pompage-turbinage	0,001	0,001	Pour DH = 100 m
Capacités			
- Ultra-capacités	0,02		
- Supercapacités	0,01		
Batteries			
- Li ion	0,5 – 0,7		
- NiCd	0,2		
- Pb	0,14 – 0,17		
Hydrogène comprimé	143	4	P= 350 bar
Gasoline	42	37	
Acide formique	5,2	6,4	

Stockage direct : capacité comparée des différents systèmes



Source : Fraunhofer

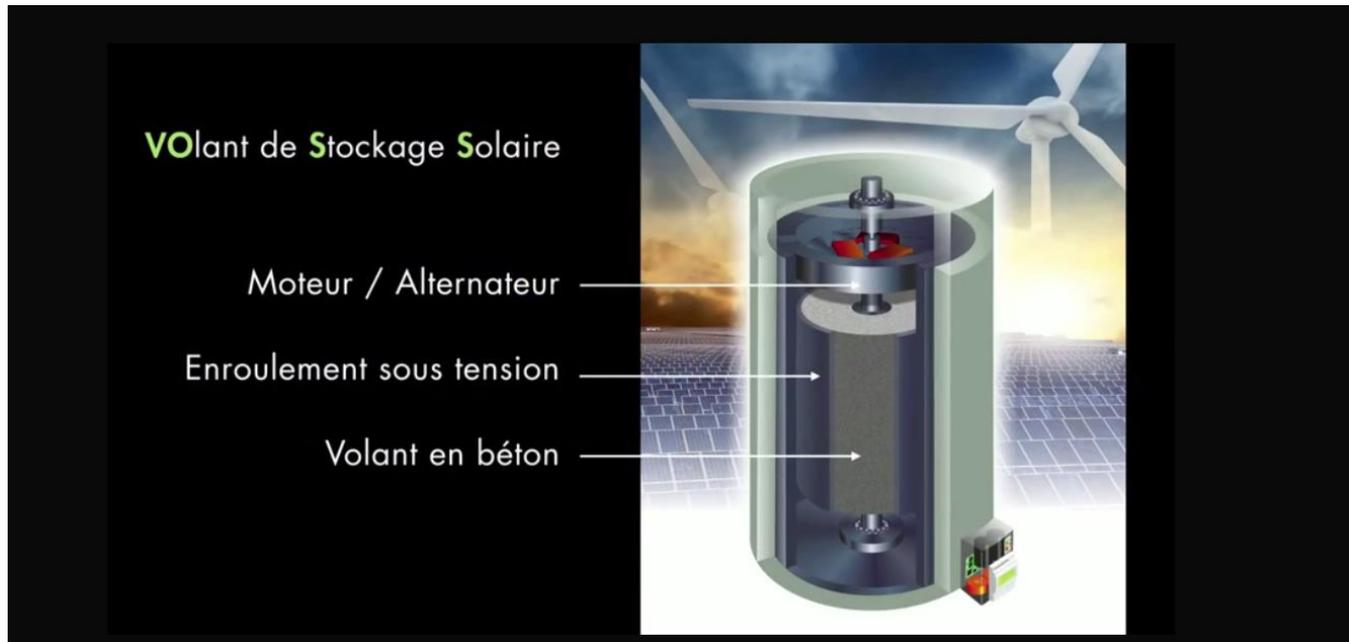
Stockage direct – Volant d'inertie

F2/D1 - USAGE : domestique ou embarqué (véhicules)

Capacité faible, technique de niche pour application domestique ou embarquée

Exemple : nouveau système avec volant en béton avec bande de serrage précontrainte

Système développé en France par ENERGIESTRO (André Genesseaux). Selon son inventeur, stockage à faible coût.



Stockage direct – Batteries

F2/D1 - USAGE : domestique, industriel, embarqué et même réseaux

Capacité limitée, mais très répandue, en plein essor

Exemples :

Batterie Li.ion Titanate

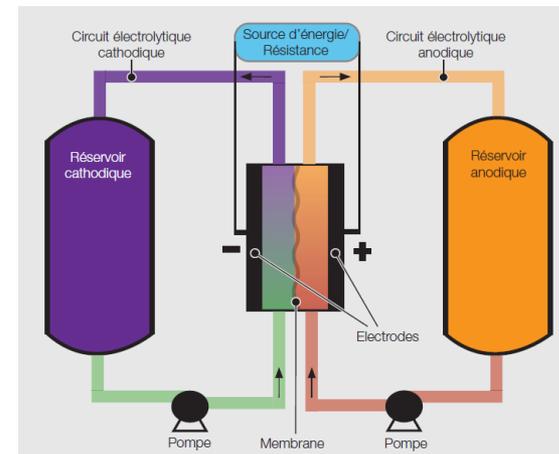
Marché prometteur et en expansion pour les applications domestique, industrielle et réseaux ainsi que pour la mobilité.

Rendement du système : **> 85 %**



Batterie redox à circulation d'électrolytes avec réduction oxydante simultanément sur l'anode et la cathode. Est déjà commercialisée mais fait l'objet de recherches. Probablement un marché de niche.

L'EPFL développe un modèle permettant la production d'hydrogène.



Stockage direct – stockage d'énergie par air comprimé

F2/D1 - USAGE : champ d'éoliennes, PV, réseaux, industrie

$\eta > 50\%$

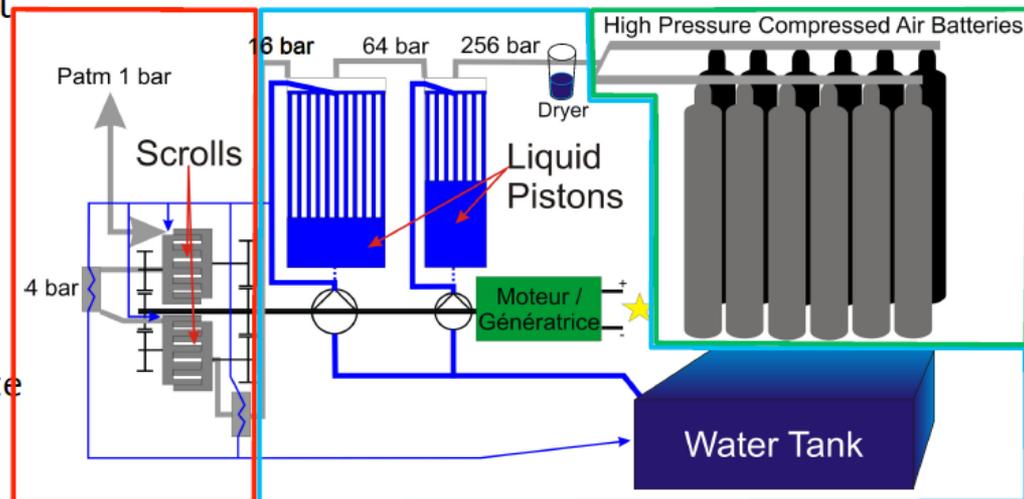
Capacité faible à moyenne, en cours de R+D. Durée entre 1h et 1 jour

Exemple : Projet HyPES de la société ENAIRYS dans le cadre de l'EPFL

Objectif : expérimenter 3 prototype de 25 kW puis développer un modèle de 250 kW

- Le système HyPES[®] (stockage d'énergie hydropneumatique) est constitué de 3 parties:

- Unité de pré-compression et post-détente scrolls
- Unité de compression / détente hydropneumatique
- Unité de stockage par batteries de bouteilles à haute pression



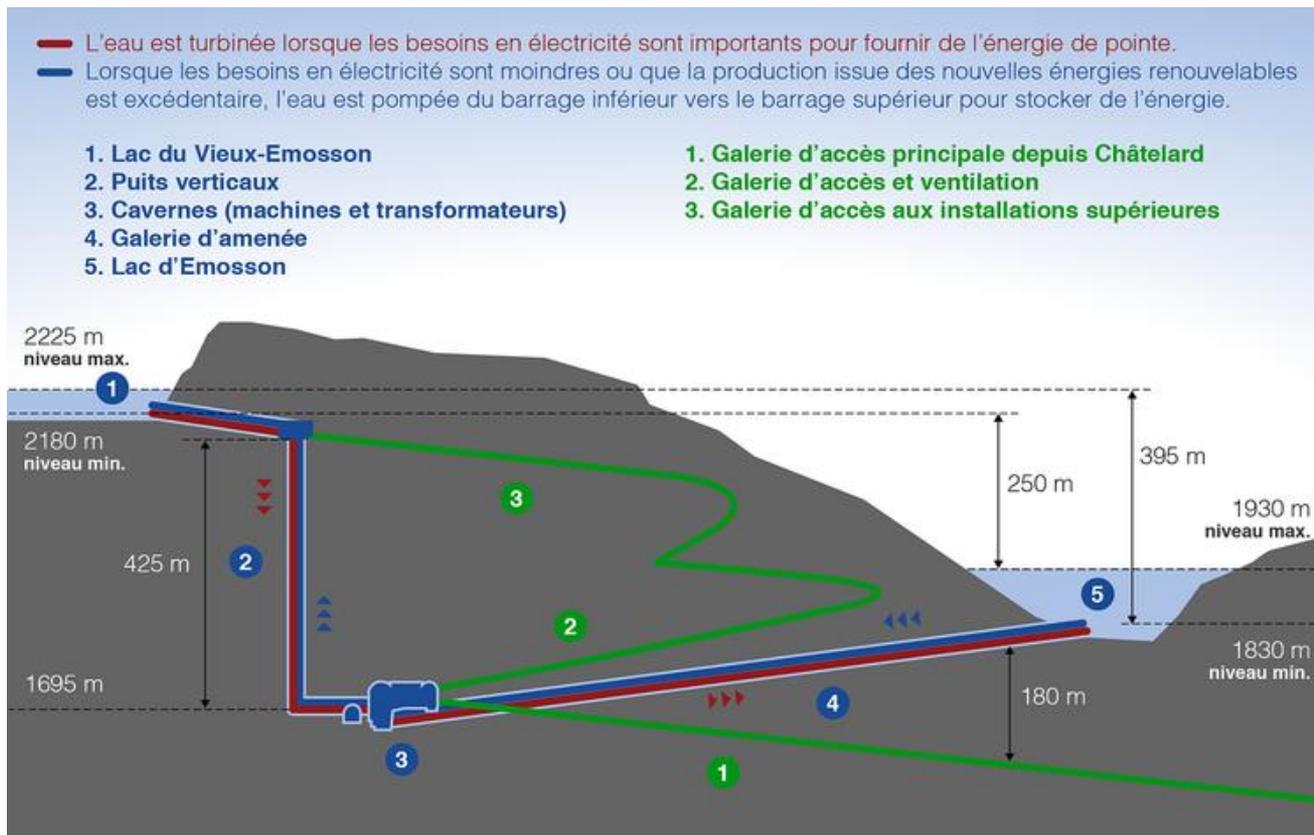
Stockage direct - hydraulique par pompage-turbinage

F2/D1-D2 - USAGE : réseaux électriques

$\eta > 80\%$

Grande capacité, utilisé principalement pour la puissance de réglage des réseaux THT.

Exemple ; Nant de Drance



Stockage direct – Power-to-Gas - fabrication de gaz synthétique à partir d'électricité renouvelable et distribution par réseau gaz

F2/D1-D2 - USAGE : production décentralisée d'électricité

Grande à moyenne capacité, utilisé pour des couplages chaleur-force ou des cycles combinés

Exemple : installation de Flakenhagen (D)

Processus en 2 phases, respectivement tout d'abord production d'hydrogène par électrolyse puis transformation de l'hydrogène en CH₄ (gaz synthétique par combinaison avec CO₂).

Projet de Falkenhagen : seulement la phase 1 actuellement.



254 x 143 mm

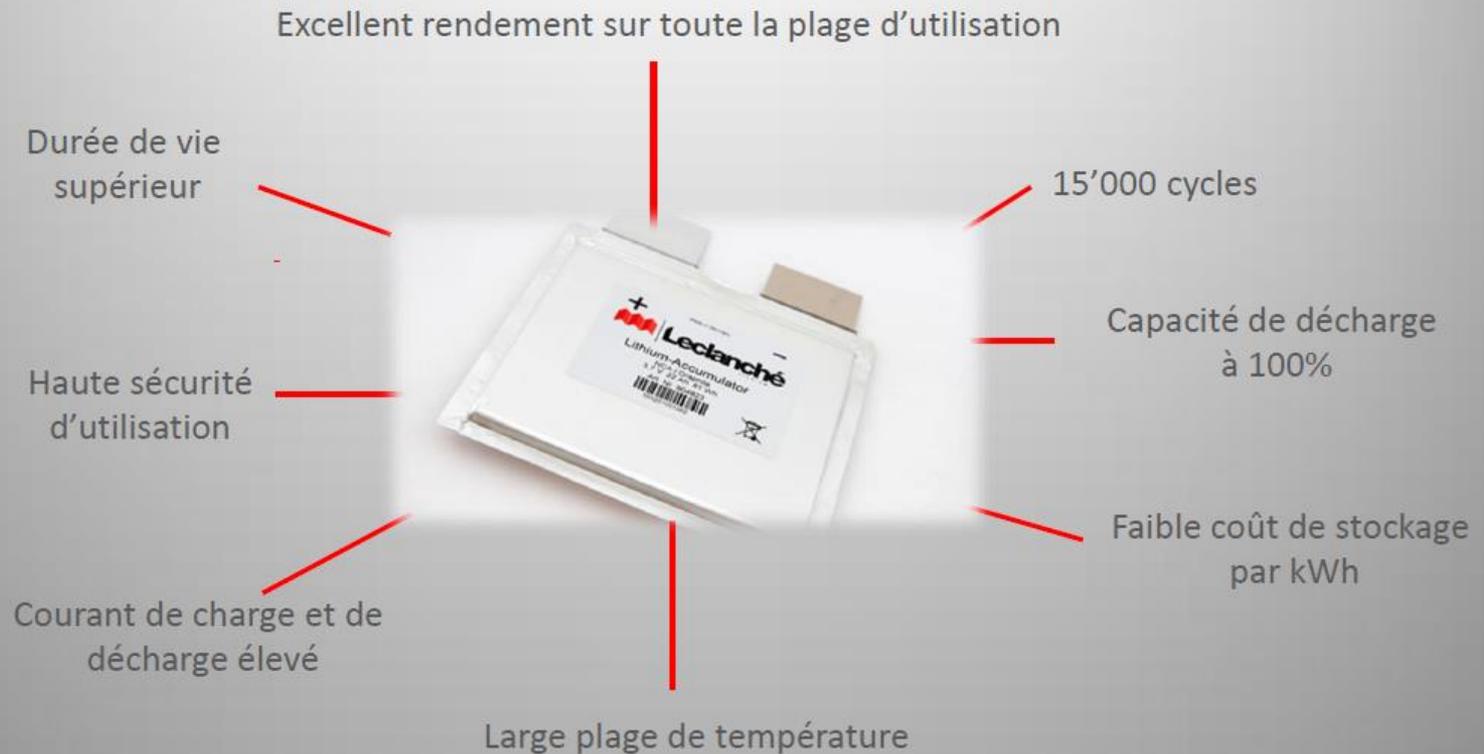


3. Stockage d'énergie solaire par batteries

Projet réalisé par LECLANCHE à l'EPFL en partenariat avec la Romande Energie, l'EPFL et le canton de Vaud

- ❑ **Objectif** : tester à l'échelle industrielle le stockage d'énergie électrique solaire avec des batteries de grande capacité et de longue durée de vie.
- ❑ **Batteries** : Cellules de Li-ion Titanate (8'100 cellules de base), capacité de stockage : 500 kWh, nombre de cycles : 15'000. 1 onduleur unique de 720 kVA.
- ❑ **Dispositif** : utilisation de la production des champs PV de l'EPFL de 15'000 m², avec 1 container contenant toutes les installations pour le stockage et le déstockage de l'électricité. Branchement de l'installation sur le réseau MT alimentant l'EPFL. Puissance de réinjection : 2 MW.
- ❑ **Capacité de 500 kWh** : équivalent à la production de 2'500 m² de panneaux PV en 1 heure ou à la consommation d'une centaine de ménages toute une journée.
- ❑ **Mis en service** : octobre 2015.
- ❑ **Durée de l'expérimentation** : 13 mois

La cellule Leclanché Lithium-ion Titanate



Les solutions de stockages industrielles Ti-Rack



Cellule Li-Ion Titanate Leclanché :	2.3 V – 30 Ah
Module 20S 3P :	46.6 V – 90 Ah = 4.2 kWh
String (Armoire de 15 module S) :	700 V – 90 Ah = 63 kWh
Container (9 armoires P)	9 x 63 kWh = 567 kWh



Module 20S 3P

Armoire type
15 modules: 700 V - 63 kWh
(titanate Leclanché)

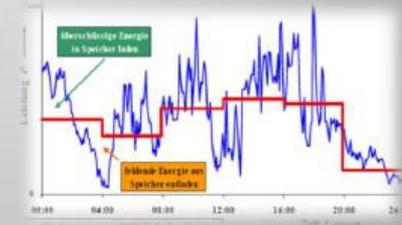


Les containers – the MegaWatt class

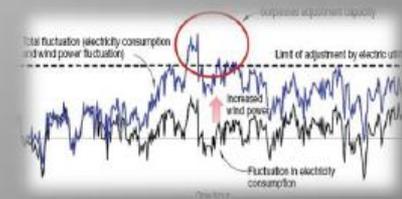


567 kWh Container

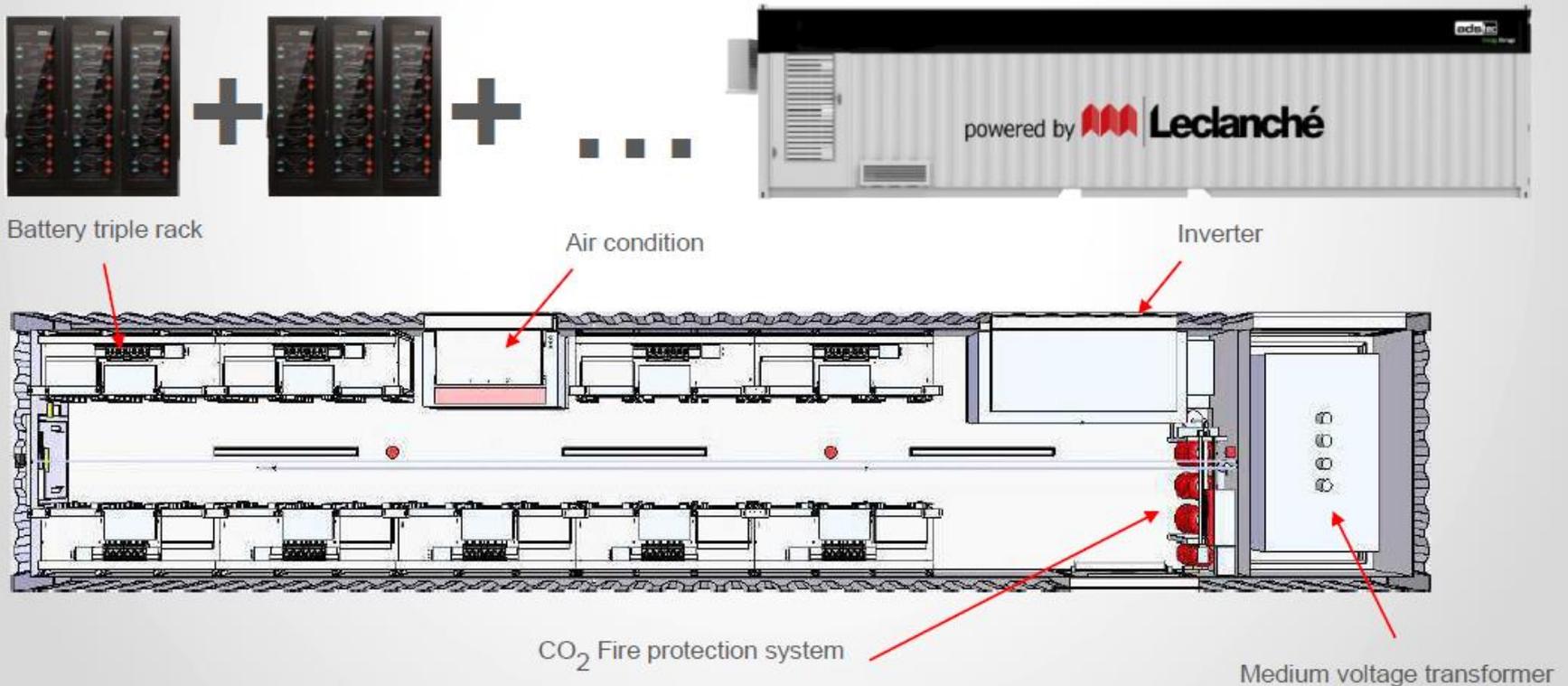
Energy Shifting



Peak Shaving



3. TiRack Industrial Storage: Bis zu 500kWh Speicherkapazität pro Container, beliebig erweiterbar



Bern 12.08.2014 - Speicherlösungen von Leclanché für die Energieversorgung von morgen - Andreas Niederholz – Confidential © Leclanché GmbH

Nouveau projet LECLANCHE sur l'île de Graciosa dans les Açores

- ❑ **Objectif** : 65% d'autonomie électrique de l'île, en mettant en place un champ de panneaux PV de 1 MW, un parc d'éoliennes de 4 MW et un stockage d'électricité de 3,2 MWh/6 MW.
- ❑ **Stock**: fourni par LECLANCHE. Même modèle de cellules de Li-ion Titanate que pour l'EPFL.



Nouveau projet LECLANCHE sur l'île de Graciosa dans les Açores



Projet de stockage résidentiel d'énergie à Yverdon Collaboration entre le Service des Energies SEY et LECLANCHE

- ❑ **Objectif** : tester les nouvelles solutions pour optimiser l'autoconsommation
- ❑ **Projet** : utilisation de 2 systèmes séparés permettant de faire de l'autoconsommation à partir d'une installation PV constituée de 2 groupes de 5 panneaux PV d'une puissance totale de 2 x 1,6 kWp
- ❑ **Système 1** : **SMA** avec 1 onduleur pour alimenter le réseau ou la batterie, 1 onduleur pour la gestion de la charge et décharge de la batterie et 1 batterie LECLANCHE TIBOX Li-ion Titanate 3,2 kW/3,2 kWh.
- ❑ **Système 2** : **NEDAP** avec une solution intégrant l'onduleur et le gestionnaire de batteries dans un seul boîtier.
- ❑ Installé à l'usine LECLANCHE à l'Avenue des Sports 42 à Yverdon-les-Bains, avec les systèmes de gestion et de stockage installés dans le hall d'entrée de l'usine (Show-Room). Les consommateurs sont simulés.

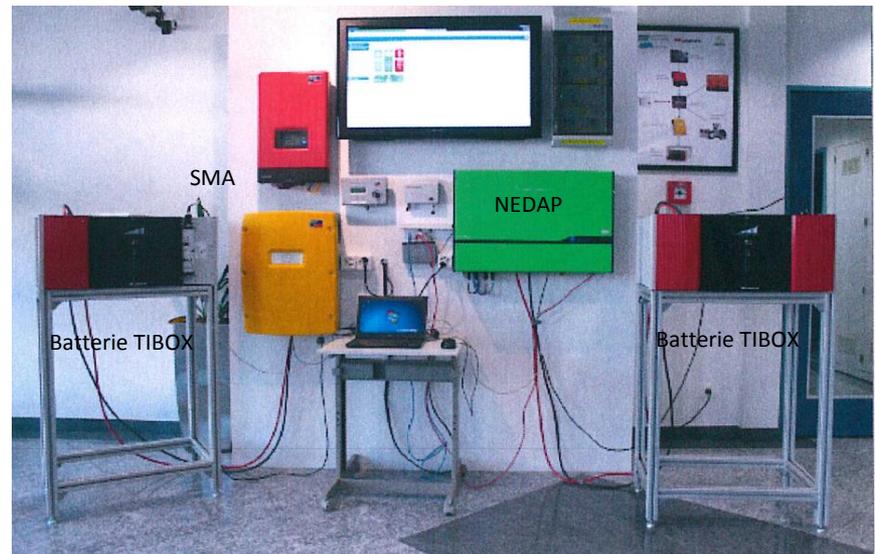


Schéma du système SMA

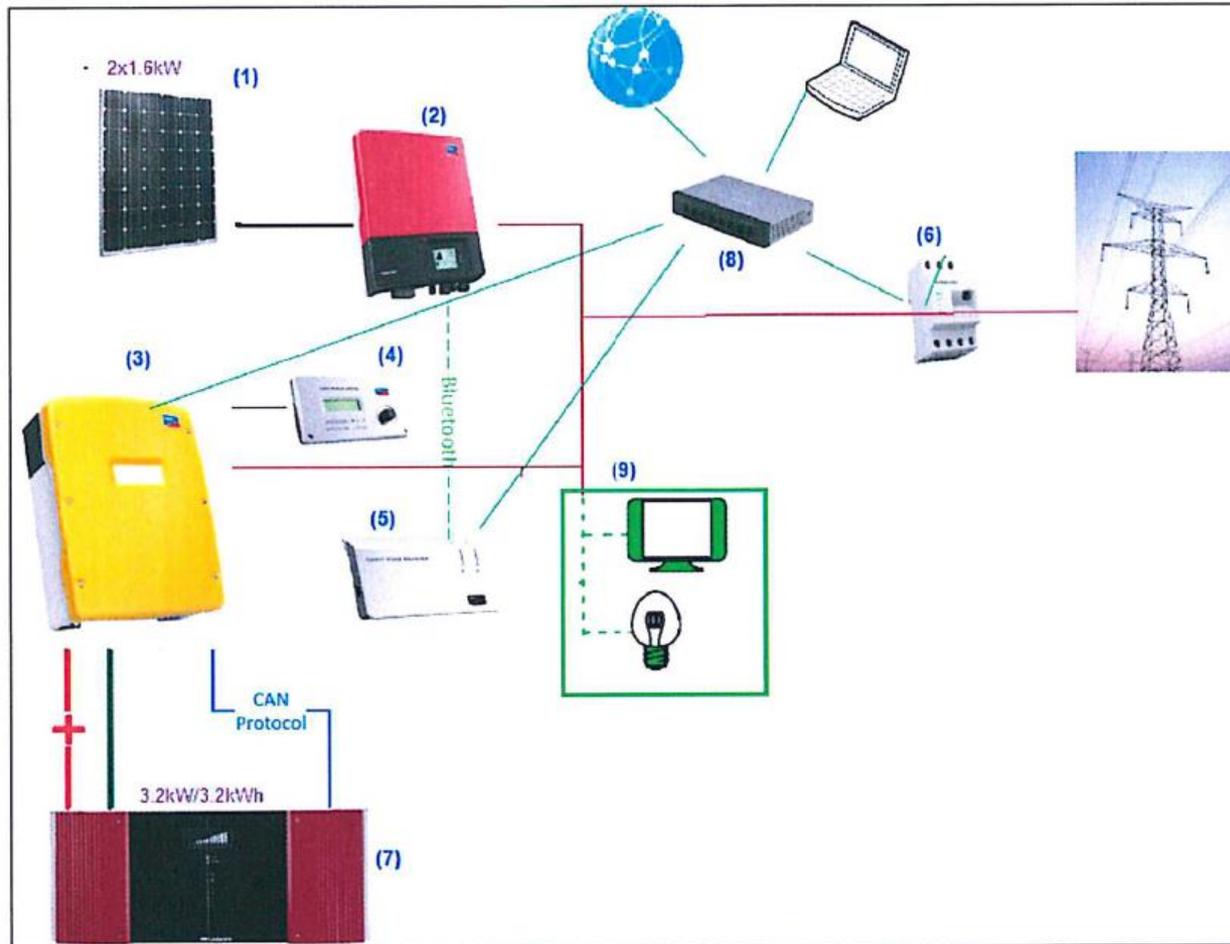
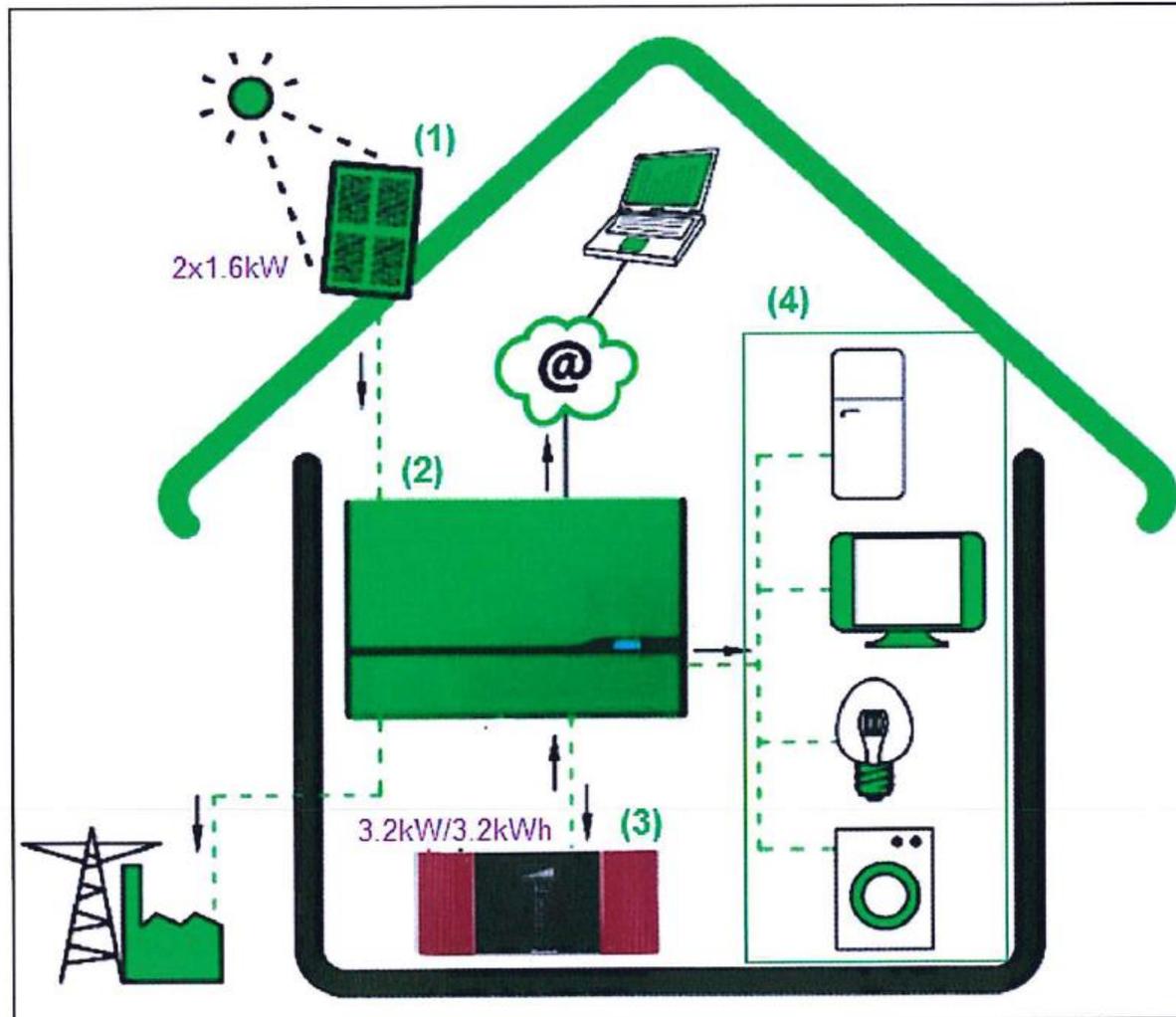


Schéma du système NEDAP



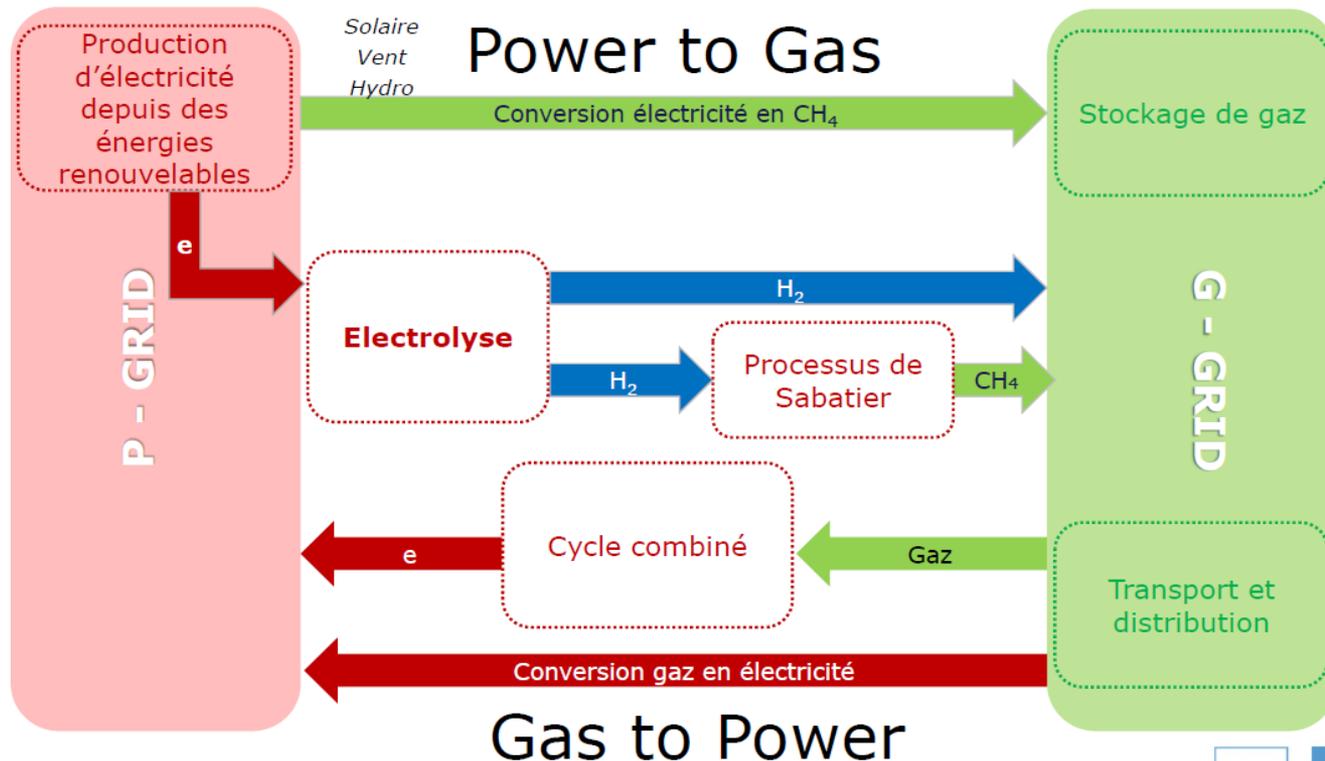
Projet de stockage résidentiel d'énergie à Yverdon

Premières observations sur une année de mesures

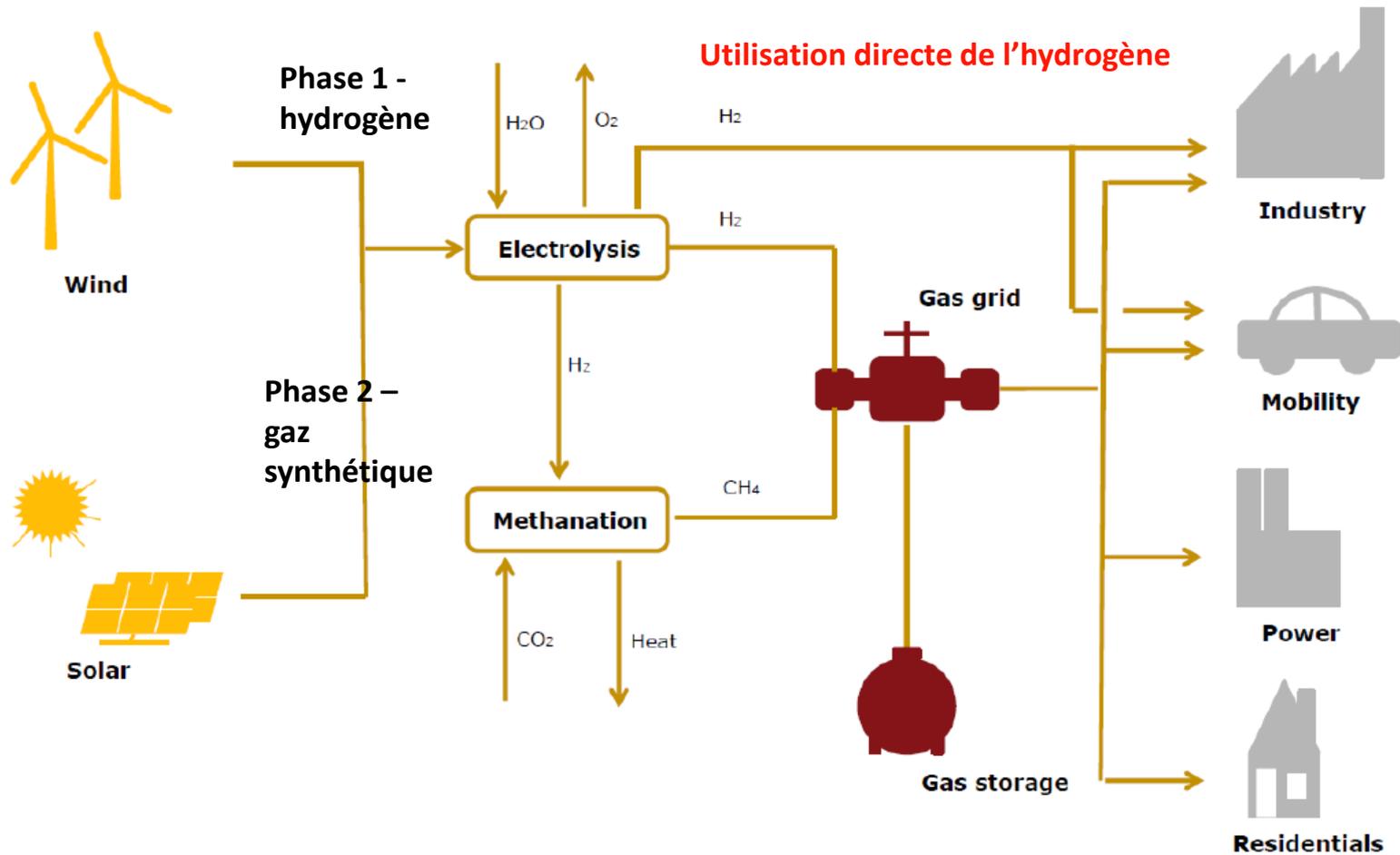
- ❑ **Le taux d'autoconsommation**, soit le rapport entre la consommation directe de courant PV et la production totale de courant PV oscille entre **38 à 44 %**
- ❑ **Le taux d'autosuffisance**, soit le rapport entre l'alimentation propre en courant PV (autoconsommée et réinjectée sur le réseau) et la consommation totale d'électricité oscille entre **50 et 55%**.

4. Stockage d'énergie Power-to-Gas

Concept Power-to-Gas

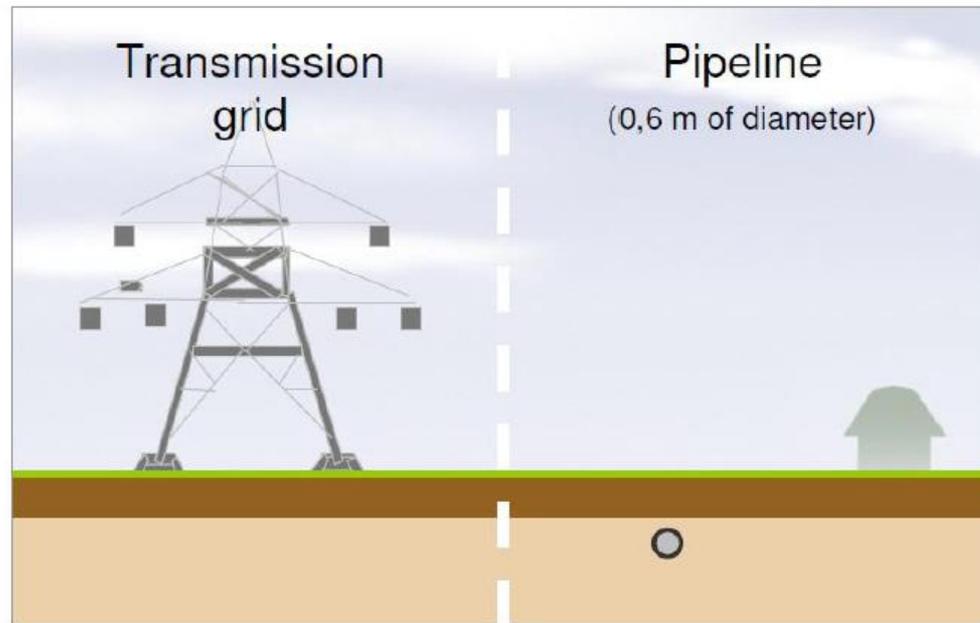


Applications Power-to-Gas



Comparaison du transport électricité vs gaz

Comparaison de capacités de transport
1 GW (1000 MW) power vs. 3 GW gas



Projet P2G de Falkenhagen (D)

Paramètres clés

- Puissance installée: 2 MWeI
- Production hydrogène: 360 m³/h
- Injection réseau haute pression (ONTRAS – VNG Gastransport)
- Début construction: 08/20/2012; Inauguration 08/28/2013
- Propriétaire/partenaire projet:  

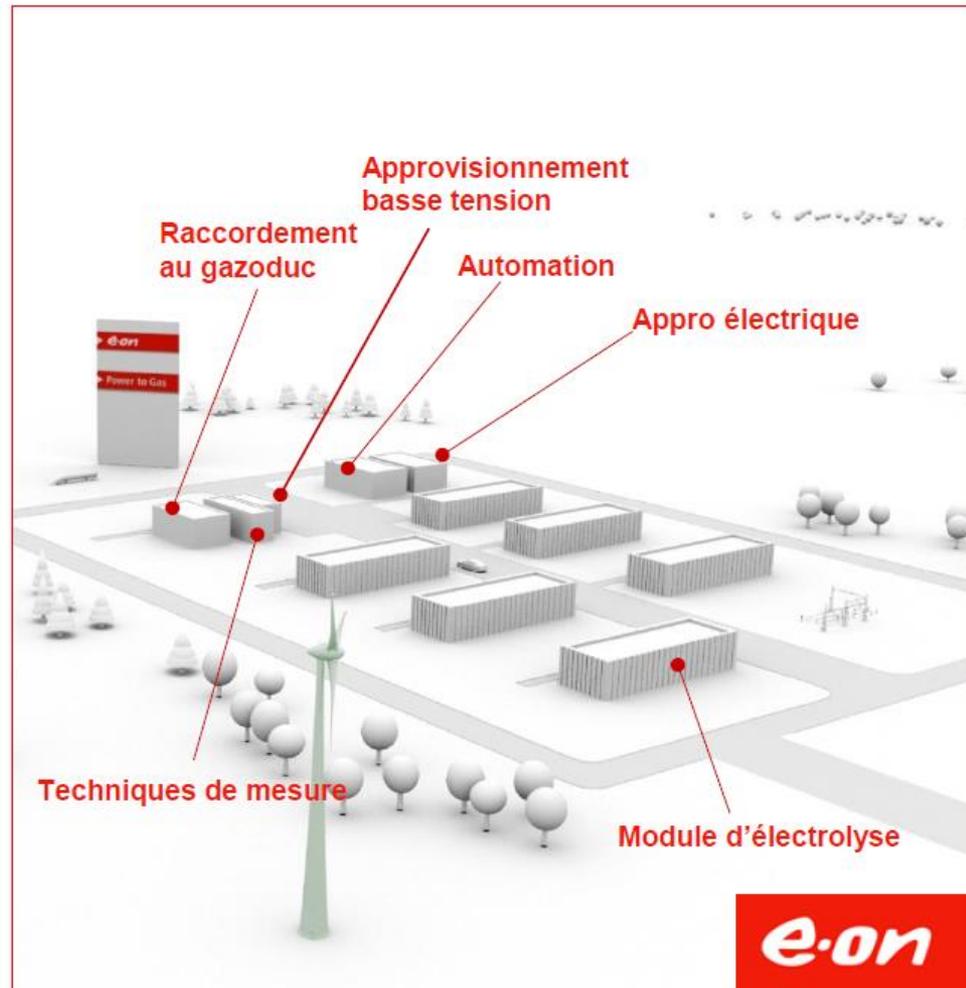


Objectifs

- Démonstration du processus
- Optimisation du concept opérationnel (fluctuation du vent vs demande de gaz)
- Utilisation du courant éolien pour la production de H₂
- Gagner de l'expérience au niveau technologique et économique



Installation P2G de Falkenhagen (D)



Une installation P2G en Suisse : Regio Energie Solothurn





Premières observations

- ❑ La technique du Power-to-Gas (P2G) permet de stocker l'électricité à grande échelle
- ❑ Les applications de l'utilisation du gaz synthétique CH₄ sont nombreuses
- ❑ Au stade actuel, les projets à l'échelle industrielle se concentrent sur la première phase du processus P2G à savoir l'électrolyse de l'eau avec du courant renouvelable pour produire de l'hydrogène, en raison du coût élevé du gaz synthétique, pas encore commercialisable (environ 6 x plus cher que le gaz naturel).
- ❑ Les installations de grande taille comme Falkenhagen (360 m³/h H₂) permettent d'acquérir des bonnes connaissances sur l'électrolyse de grande taille et d'améliorer le rapport coût/efficacité du processus.
- ❑ En Suisse, il y a de l'intérêt pour des projets pilotes, voir Soleure, mais il faudra encore attendre bien quelques années avant de voir des projets industriels avec la production de gaz synthétique.

5. Stockage sous forme acide formique

Stockage H₂ en acide formique (HCOOH) - particularités

homogeneous catalytic system

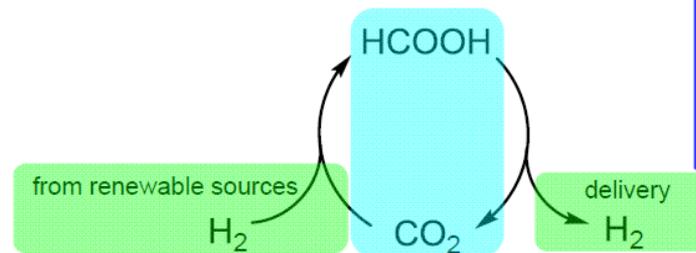
- ✓ efficient, simple
- ✓ generate very pure H₂ (and CO₂)
- ✓ at any wanted pressure up to 110 MPa
- ✓ constant high pressure H₂ delivery
- ✓ in water

C. Fellay, P. J. Dyson, G. Laurency, *International Patent*, 2006.
C. Fellay, P. J. Dyson, G. Laurency, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2008, 47, 3966.



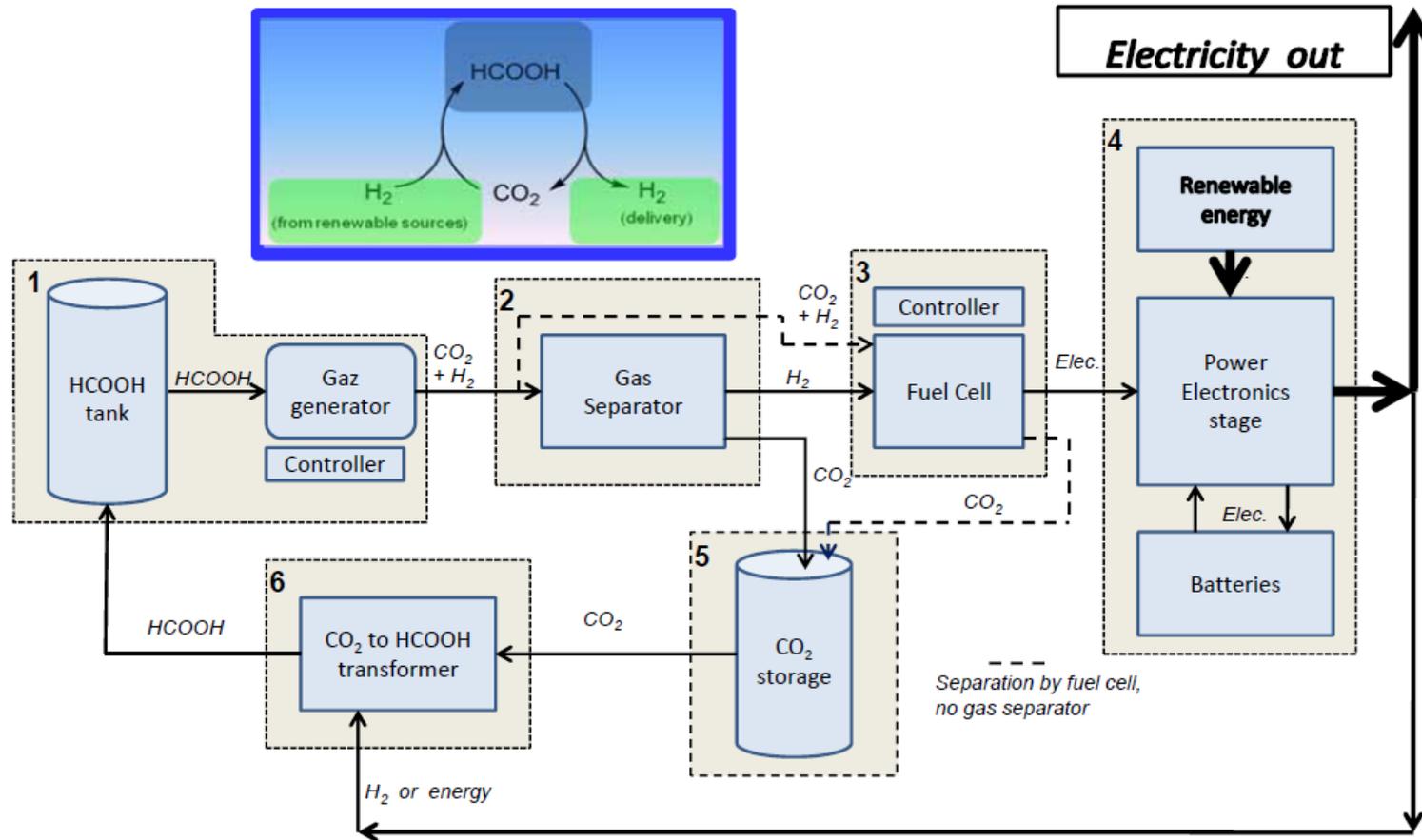
Advantages of HCOOH:

- ▶▶ it has a flash point – ignition temperature of + 69 °C
- ▶▶ the 85 % formic acid is not inflammable
- ▶▶ the diluted formic acid is a food additive (US Food and Drug Administration)
- ▶▶ only gaseous products



Stand – alone unit for energy storage, no need: electricity/gas/oil network

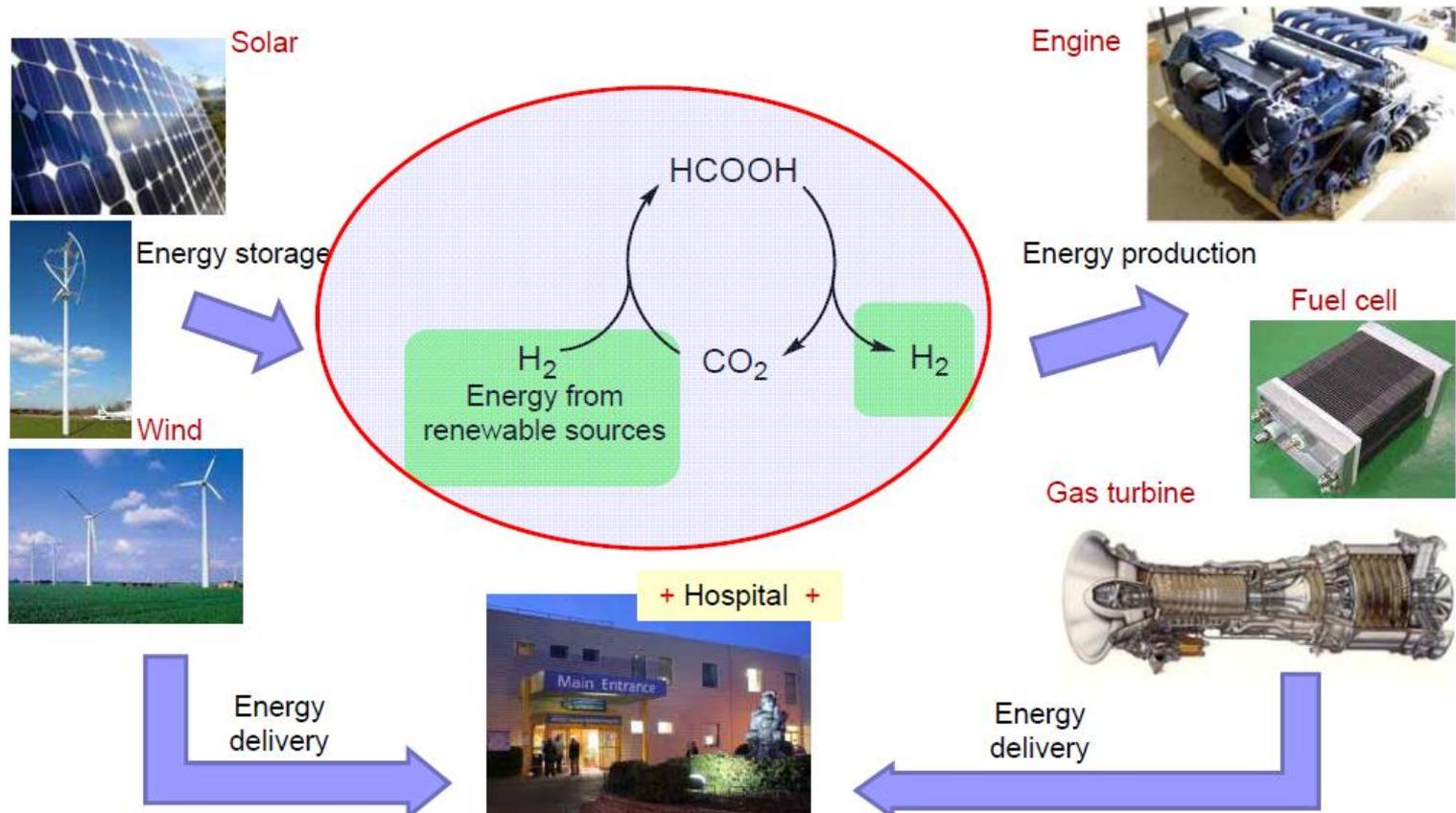
Processus



Summary: *Formic acid as hydrogen source – recent developments and future trends*

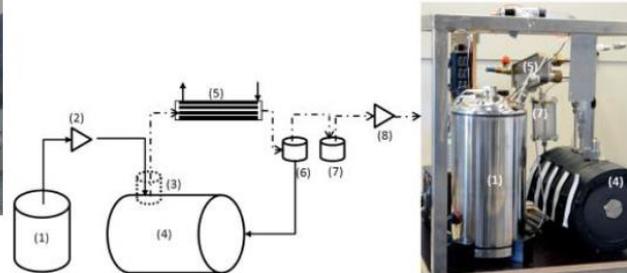
Martin Grasemann, Gábor Laurenczy, **Energy & Environmental Science, 2012, 5, 8171.*

Energie renouvelable/hydrogène – utilisation et stockage



Projet de démonstration : bateau avec pile à combustible alimenté en hydrogène à partir d'un stock d'acide formique

Demonstration: Formic acid (H₂) fuelled boat



A hydrogen generator designed and built in for a power output of **2 kW** (60 L/min of H₂/CO₂)

(1) Formic acid tank - (2) Pump - (3) Tube in tube heat exchanger - (4) Reactor - (5) Heat exchanger - (6,7) Condensate separators - (8) Mass flow controller.

March 2013, Yverdon, Switzerland

Summary: *Formic acid as hydrogen source – recent developments and future trends*

Martin Grasemann, Gábor Laurenczy*

Energy & Environmental Science, 2012, 5, 8171.

Concept de stockage annuel pour une villa

Installation PV projetée (prix 2014) :

40 panneaux BenQ	265 W
Surface PV	64 m ²
Orientation :	plein sud
Puissance :	10,6 kW
Coût net après déductions	20'406.--

Bilans annuels :

Consommation totale électricité :	10'600 kWh
Dont : PAC	5'600 kWh
Autres usages :	5'000 kWh
Production PV évaluée à	10'000 kWh
Consommation directe :	2'000 kWh
Electricité refoulée :	8'000 kWh
Taux d'autoconsommation :	20 %

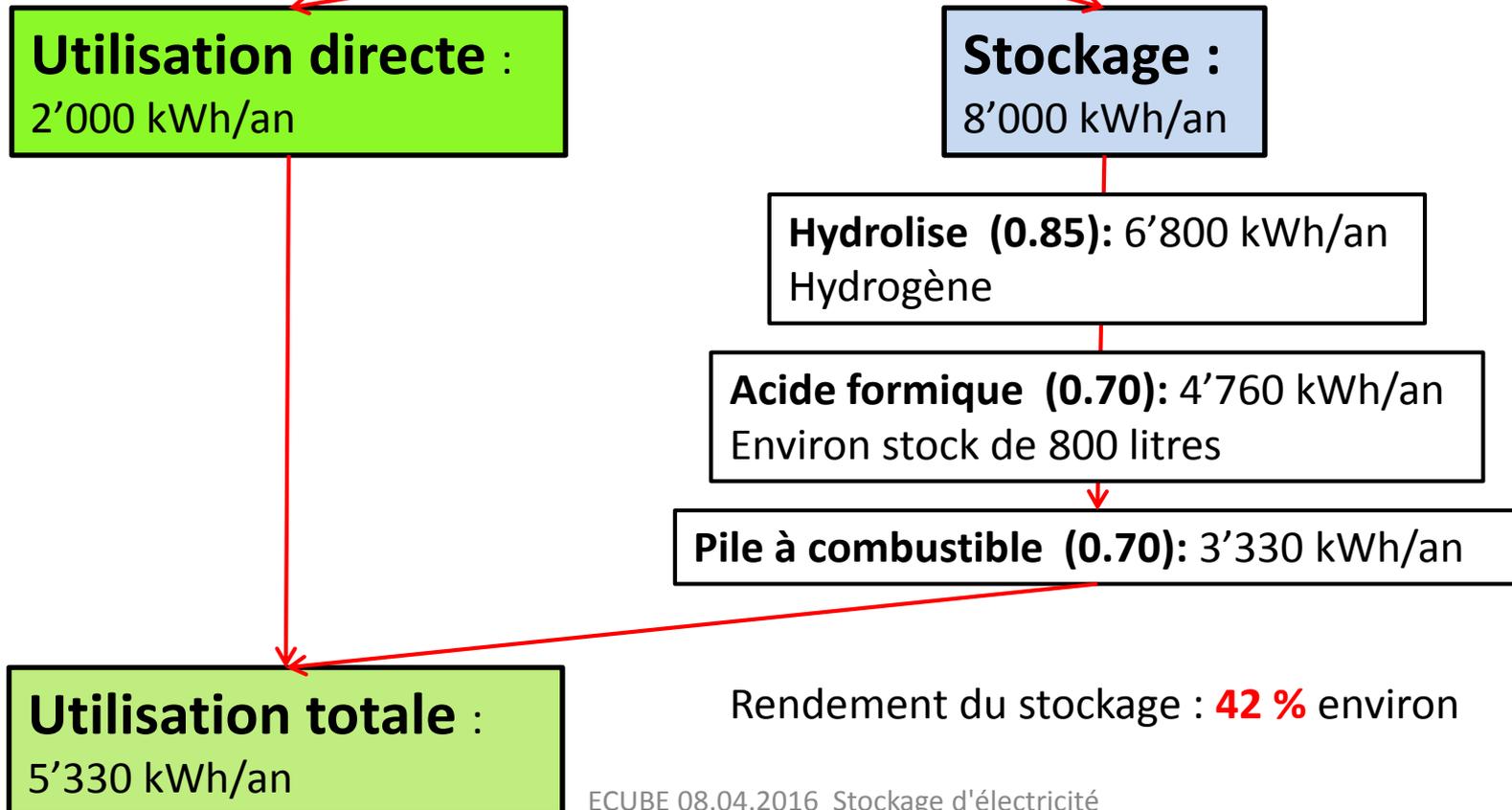


Villa : PV + stockage acide formique + pile à combustible

Concept :

PV 10'000 kWh/an

*Bilans =
Première évaluation !*





Villa : PV + stockage acide formique + pile à combustible

Premières observations

- Le rendement de stockage est relativement bas. L'objectif des recherches est de dépasser 60 %
- Les recherches actuelles semblent s'orienter sur la voie CO₂, bien meilleur marché, mais avec un rendement plus faible. C'est le choix moderne entre le rendement max et le coût min.
- La présence d'une PAC avec consommation concentrée en hiver influence clairement le taux d'autoconsommation
- Il est difficile d'accroître la surface de captage PV plein Sud. Par contre, on peut choisir des cellules PV avec des rendements supérieurs.
- Un grand potentiel existe certainement dans une meilleure gestion des installations internes et appareils électriques.
- Un intérêt certain est celui de la sécurité d'approvisionnement en cas de rupture de fourniture par exemple en cas de blackout ou de pénurie d'électricité.



5. Perspectives et idées



Stockages de grande capacité

- ❑ Le stockage de grande capacité par pompage –turbinage est momentanément menacé en raison de son manque de rentabilité (7 -8 cts/kWhe contre 2-4 cts/kWhe marché spot). Mais compte tenu de l'essor considérable des énergies renouvelables intermittentes, son rôle pourrait bien être revalorisé à moyen terme (10 ou 15 ans) pour le réglage des grands réseaux, avec un bémol: sans accord sur l'électricité Suisse-UE, ce rôle pourrait être singulièrement réduit.
- ❑ Le développement réjouissant des batteries de grande capacité (plusieurs MWh) et de grande durée de vie (15'000 cycles) permet d'envisager que cette technologie prennent une part de plus en plus prépondérante dans le réglage et la stabilisation des réseaux. Ce développement doit nécessairement être accompagné d'une gestion intelligente non seulement des réseaux mais des utilisations des appareils et processus au niveau industriel mais aussi domestique.
- ❑ Le développement des "smart" est en route, mais aux dire des spécialistes, il faudra encore de nombreuses années pour qu'il se généralise.
- ❑ La solution technique du P2G est prometteuse et complémentaire avec les autres techniques de stockage à grande échelle. Les conditions actuelles de rentabilité ne favorisent malheureusement pas un développement aussi rapide qu'espéré. Il faudra là aussi de nombreuses années avant de pouvoir disposer d'installations de taille industrielle économiquement viables.



Applications pour le niveau domestique

1. Les batteries, une solution pragmatique pour l'augmentation de l'autoproduction

- ❑ De nouvelles générations de batteries arrivent sur le marché, avec des capacités de stockage et une durée de vie accrue pour des prix inférieurs.
- ❑ L'évolution de la RPC rend les grandes installations PV nettement moins attractive. La tendance du marché est actuellement aux petites installations avec stockage par batteries comme évoqué ci-avant.
- ❑ L'évolution en parallèle des systèmes d'onduleurs et de gestion de la charge et décharge rend encore plus efficace la mise en œuvre de systèmes de stockage associés à une production photovoltaïque.

Perspectives pour le niveau domestique

2. Performances attendues des nouveaux système

- ❑ Selon M. Stéphan Kolly, project Manager chez LECLANCHE et responsable du projet à l'EPFL et à Yverdon, avec les nouvelles technologies ,et en gérant correctement ses consommations internes, on peut admettre :

Taux d'autoproduction, sans stockage ; en moyenne 30 %

Taux d'autoproduction avec stockage : en moyenne 60 %

- ❑ Le prix des nouvelles batteries Li-ion Titanate de 6,3 kWh est descendu à moins de 4'000.—
- ❑ Exemple d'un système de stockage performant existant sur le marché :

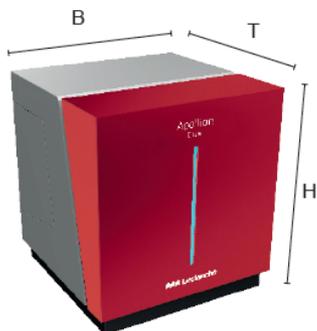
Batterie LECLANCHE Apollion Cube
Lithium-ion/6,3 kWh/6,5 kW

+

Onduleur marque IMEON (FR) intégrant la gestion de la batterie et toute la gestion PV/batterie/ilotage/ Télégestion.

Perspectives pour le niveau domestique

1. Les batteries, une solution pragmatique : un couple efficace



Données techniques Apollion Cube

Technologie de cellule	lithium-ion (NMC)
Capacité nominale du système	6,3 kWh
Tension nominale	54,7 V
Tension de charge maximale	61,5 V
Tension de décharge maximale	41,0 V
Courant maximal	80 A
Courant de décharge maximal	300 A (3 sec.)
Puissance de décharge maximale	6.500 W
Rendement	97%
Décharge profonde	80%
Nombre de cycles prévus	5.000
Dimensions	
Largeur	675 mm
Profondeur	475 mm
Hauteur	537 mm
Poids	95 kg

Onduleur IMEON



Une idée déjà efficace

- ❑ M. Stephan Kolly dispose d'une installation PV chez lui.
- ❑ Caractéristiques : 30 m² PV / 5 kWp / 6 MWh/an
- ❑ Sa consommation propre : 5 MWh
- ❑ Grâce à des enclenchements décalés (aux heures ensoleillées), il obtient déjà sans stockage un taux d'autoconsommation de 50%

Production PV hiver



Production PV été



Merci pour votre attention !

Projet LECLANCHE EPFL - Film sur youtube

<https://www.youtube.com/watch?v=RSd1Z7N3vCI>

Projet LECLANCHE GRACIOSA

https://www.youtube.com/watch?v=vrM7PrH4A_k