ARPEGE MOBILITE DURABLE

Colloque Energie du CNRS

Scénarios énergétiques pour la mobilité durable à l'horizon 2050

07 décembre 2021

Nadia YOUSFI STEINER & Matthieu BECUWE

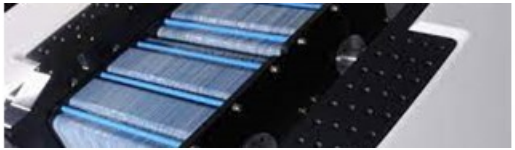
Compétences couvertes par l'ARPEGE

Les axes principaux (APs)

AP 1 – Stockage électrochimique

- Matériaux
- Caractérisations électrochimiques
- Micro-batteries
- caractérisations structurelle & physiques
- Lois de vieillissement, prédiction durée de vie, évaluation état de santé
- Modélisation et Caractérisation électromécanique des assemblages
- AST
- Gestion de l'Energie

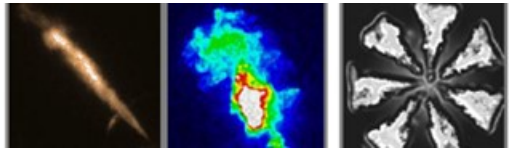
L. CROGUENNEC / J.-M. VINASSA / M. BECUWE



AP 2 – H_2PAC

- Génération (électrolyse, hydrolyse, thermolyse)
- Stockage (hydrures).
- Chimie des Matériaux.
- Caractérisations électrochimiques
- Electrodes, catalyseur.
- caractérisations structurelle & physiques
- Lois de vieillissement, prédiction, AST
- durée de vie, SOH
- Gestion de l'Energie, contrôle système

N. YOUSFI STEINER / U. DEMIRCI



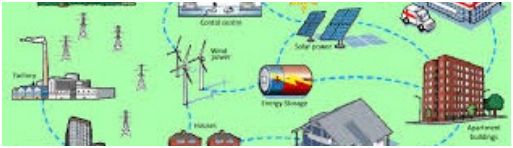
AP 3 - Combustion

- Nouveaux carburants/modes de combustions avancés.
- Carburants (efuels, hydrogène, NH_3, alcools, XTL)
- Gas (naturel, bio, synthetic), esters, Acetone-Butanol-Ethanol, …),
- carburants 3ième generation (algues)
- Combustion modes (Gasoline Direct Injection, Gasoline Compression Ignition , Dual fuel, HCCI, GPPC, ...boosted).

C. ROUSSELLE

Compétences couvertes par l'ARPEGE

Les axes transversaux (ATs)



AT 1 – Systèmes multi-sources

- Embarqués, stationnaires
- Modélisation, conception, caractérisation, contrôle, diagnostic
- Gestion de l'Energie
- optimisation

M. SECHILARIU

AT2 – Filière durable

- Ressources,
- Démantèlement,
- Recyclabilité,
- Ecoconception,
- LCA, sobriété énergétique.

M. BECUWE

AT3 – Impacts sociétaux

- Environnementale : sobriété énergétique.
- Socio-économique : modèle économique, modèle sociétal.

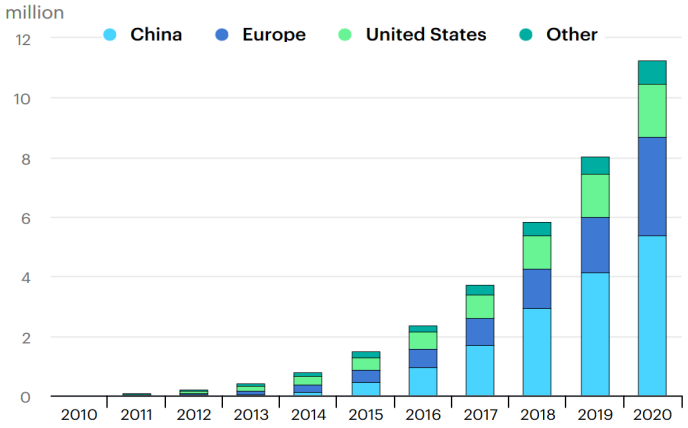
N. SIMONCINI

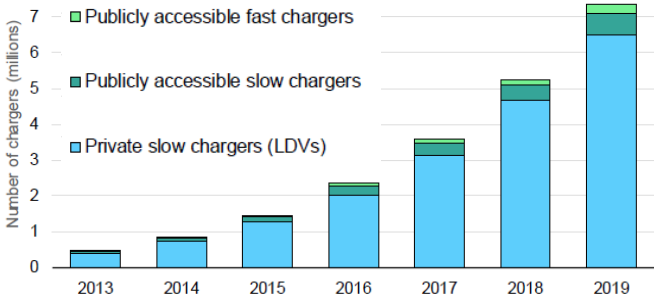
Démarche initiale

Apport de la vision systémique (AT1)

Le contexte actuel – Suppression énergies « fossiles »

- Stock growth of electric vehicles (EVs)
  - Battery Electric Vehicle (BEV)
  - Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)
- Growth of charging infrastructures for low-duty vehicles (LDVs)
  - 67% of EV owners have access to at least one private charger at home and/or workplace
  - Slow chargers represent the main deployment





Source : International Energy Agency, Global_EV_Outlook_2020/2021

AT 1 – Impact de l'électromobilité sur le réseau public

- French public grid (2019)
  - 537.7 TWh total energy production
  - 135.328 GW total installed power
- Scenarios
  - Number of EVs
  - Daily trip (km)
  - Simultaneous charge
- Energy demand
- Power demand
  - Fast charge
  - Ultra-fast charge

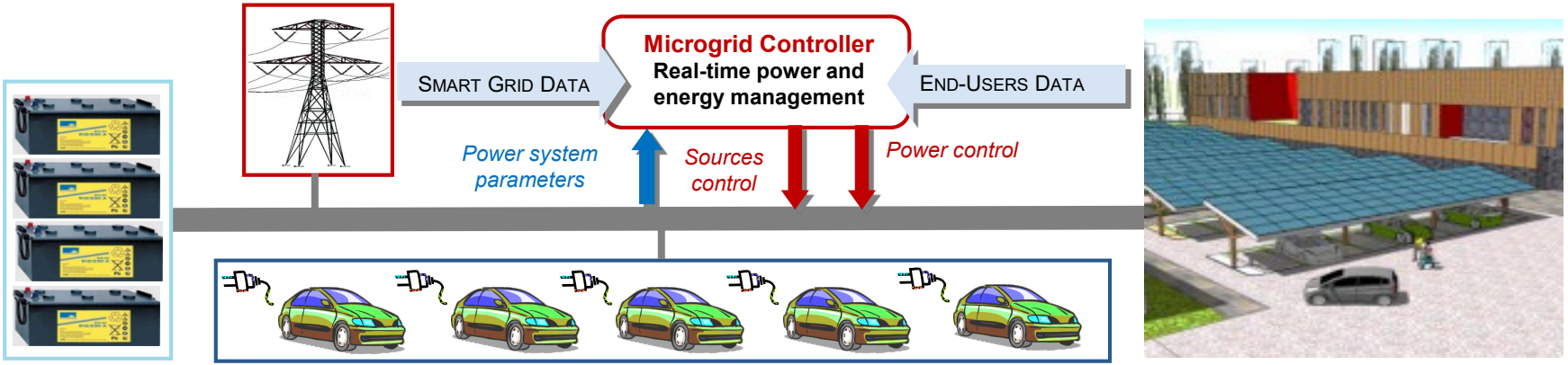
HYPOTHESES		ENERGY		POWER					
				Required power for domestic charge power (2,3kW)			Required power for slow charge power (7kW)		
Number of EVs	Daily trip in km at average consumption of 15kWh/100km	Total energy recharging GWh/year	Total energy recharging / total energy production %	GW	10% simultaneous power	% installed power	GW	10% simultaneous power	% installed power
1 000 000.00	20.00	1 095.00	0.20	2.30	0.23	0.17	7.00	0.70	0.52
	40.00	2 190.00	0.41						
	60.00	3 285.00	0.61						
5 000 000.00	20.00	5 475.00	1.02	11.50	1.15	0.85	35.00	3.50	2.59
	40.00	10 950.00	2.04						
	60.00	16 425.00	3.05						
15 000 000.00	20.00	16 425.00	3.05	34.50	3.45	2.55	105.00	10.50	7.76
	40.00	32 850.00	6.11						
	60.00	49 275.00	9.16						

AT 1 – Impact de l'électromobilité sur le réseau public

- French public grid (2019)
  - 537.7 TWh total energy production
  - 135.328 GW total installed power
- Scenarios
  - Number of EVs
  - Daily trip (km)
  - Simultaneous charge
- Energy demand
- Power demand
  - Fast charge
  - Ultra-fast charge

HYPOTHESES		ENERGY		POWER					
				Required power for fast charge power (22kW)			Required power for ultra-fast power (50kW)		
Number of EVs	Daily trip in km at average consumption of 15kWh/100km	Total energy recharging GWh/year	Total energy recharging / total energy production %	GW	10% simultaneous power	% installed power	GW	10% simultaneous power	% installed power
1 000 000.00	20.00	1 095.00	0.20	22.00	2.20	1.63	50.00	5.00	3.69
	40.00	2 190.00	0.41						
	60.00	3 285.00	0.61						
5 000 000.00	20.00	5 475.00	1.02	110.00	11.00	8.13	250.00	25.00	18.47
	40.00	10 950.00	2.04						
	60.00	16 425.00	3.05						
15 000 000.00	20.00	16 425.00	3.05	330.00	33.00	24.39	750.00	75.00	55.42
	40.00	32 850.00	6.11						
	60.00	49 275.00	9.16						

AT 1 – Intégrer les ENRs

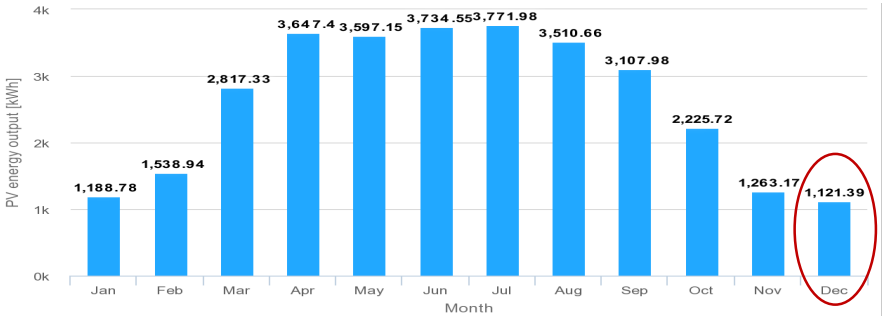


Provided inputs:

Latitude/Longitude:	49.402, 2.796
Horizon:	Calculated
Database used:	PVGIS-SARAH
PV technology:	Crystalline silicon
PV installed:	29.8 kWp
System loss:	14 %

Simulation outputs

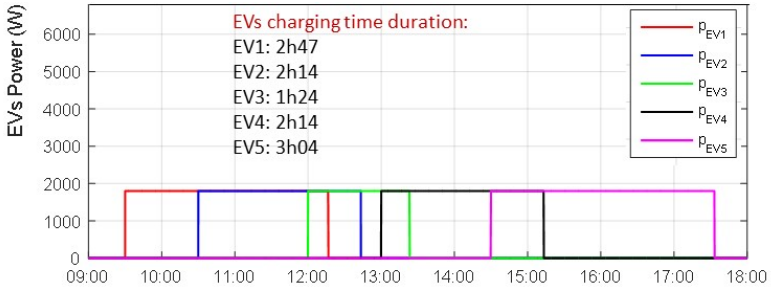
Slope angle:	35 °
Azimuth angle:	0 °
Yearly PV energy production:	31525.04 kWh
Yearly in-plane irradiation:	1314.64 kWh/
Year-to-year variability:	1250.66 kWh
Changes in output due to:	
Angle of incidence:	-3.06 %
Spectral effects:	1.71 %
Temperature and low irradiance:	-5.1 %
Total loss:	-19.53 %



Average daily PV production for December is 36.22 kWh.

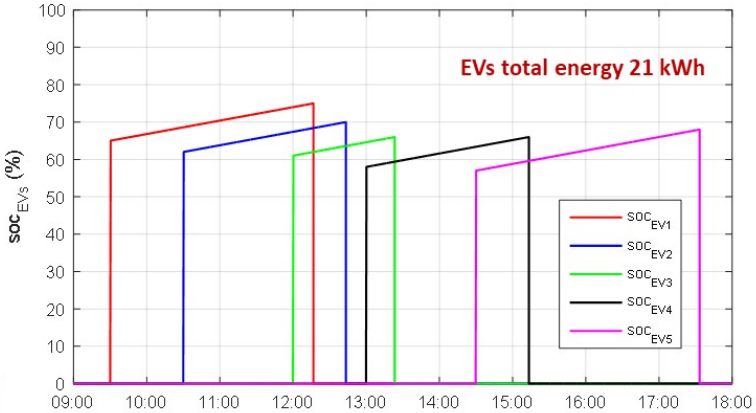
AT 1 – Scénario 1: Recharge lente de 5 véhicules

- 5 EVs to charge
- Initial and desired final EV SOC known
- Charging power (slow mode) 1.8 kW
- Arrival of Evs
  - EV1: 09:30 EV2: 10:30 EV3: 12:00 EV4: 13:00 EV5: 14:30



EVs energy flow

EVs	EV energy demand	EV energy received		PV energy		Storage discharging energy		Grid supply energy	
	kWh	kWh	%	kWh	%	kWh	%	kWh	%
EV1	5	5	100	3.79	**75.80**	1.21	24.20	0	**0**
EV2	4	4	100	3.31	**82.75**	0.69	17.25	0	**0**
EV3	2.5	2.5	100	2.28	**91.20**	0.22	8.80	0	**0**
EV4	4	4	100	3.72	**93.00**	0.28	7.00	0	**0**
EV5	5.5	5.5	100	2.70	**49.10**	2.80	50.90	0	**0**



System energy flow

PV energy (kWh)	Storage discharging energy (kWh)	Storage charging energy (kWh)	Grid supply energy (kWh)	Grid injection energy (kWh)
21.81	5.20	6.00	**0**	**0**

AT 1 – Scénario 2: Recharge lente et rapide de 5 véhicules

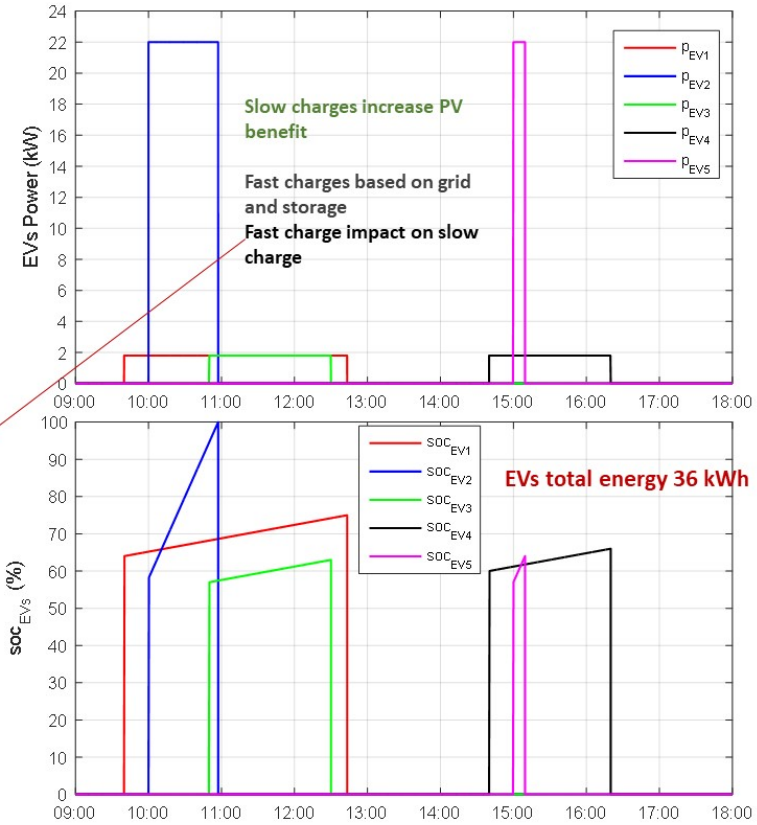
- 5 EVs to charge
- Initial and desired final EV SOC known
- Charging power: slow 1.8 kW and fast 22kW
- Arrival of EVs
  - EV1: 09:40 EV2: 10:00 EV3: 10:50 EV4: 14:40 EV5: 15:00

EVs energy flow

EVs	EV energy demand	EV energy received		PV energy		Storage discharging energy		Grid supply energy	
	kWh	kWh	%	kWh	%	kWh	%	kWh	%
EV1	5.50	5.50	100	3.52	64	0.80	14.54	1.18	21.45
EV2	21	21	100	1.52	1.24	4.99	29.76	14.49	69
EV3	3.00	3.00	100	2.58	86	0.23	7.67	0.19	6.33
EV4	3.00	3.00	100	2.09	69.67	0.74	24.66	0.17	5.67
EV5	3.50	3.50	100	0.41	11.71	1.03	29.43	2.06	58.86

System energy flow

PV energy (kWh)	Storage discharging energy (kWh)	Storage charging energy (kWh)	Grid supply energy (kWh)	Grid injection energy (kWh)
21.81	7.78	11.65	18.10	0.05



AT 1 – Bilan

- Nécessité d'intégrer des ENRs pour éviter de saturer le réseau
- Coupler au stockage stationnaire + Vehicle-to-grid (Durabilité des batteries ?)
- Implique un changement profond des profils d'utilisation, des consciences,…
- Un avenir 100% électrique (batterie) n'est pas viable!

Besoin de diversifier (limiter?) les moyens de déplacement (Hydrogène, combustion,…)

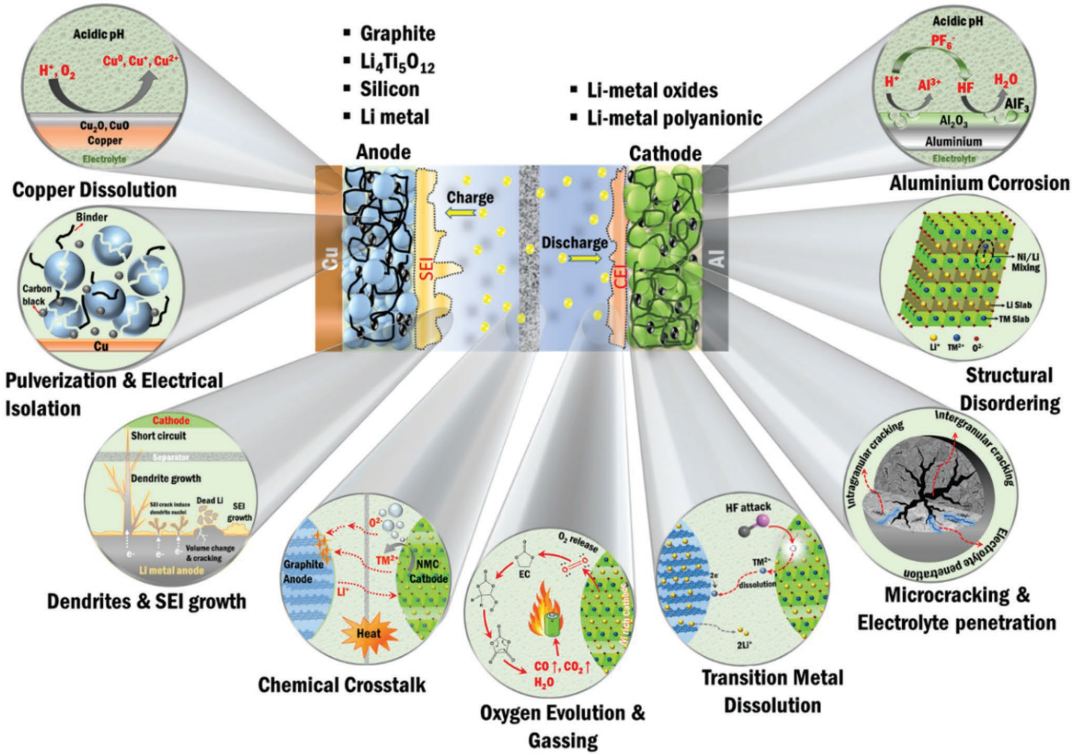
↳ Mix entre Stockage-E / PaC / Combustion directe

Quels avenir pour la mobilité ?

AP 1 - Le stockage électrochimique de l'énergie

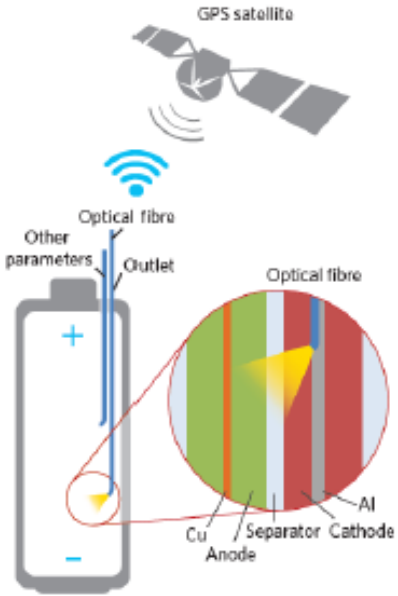
La batterie « parfaite » n'existe pas… encore !

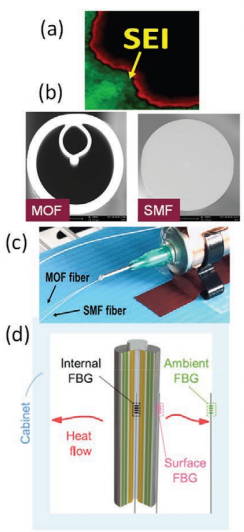
- **Les problématiques actuelles**

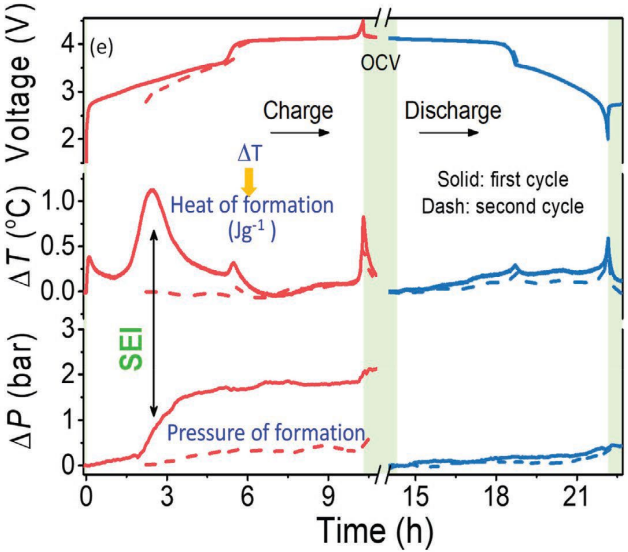


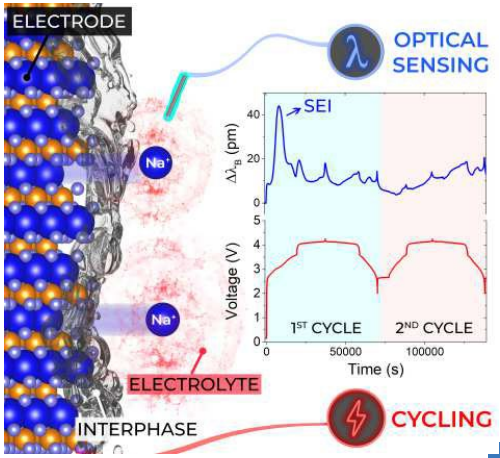
AP 1 - Le stockage électrochimique de l'énergie

- **L'avenir pour le stockage: « Sensing »**



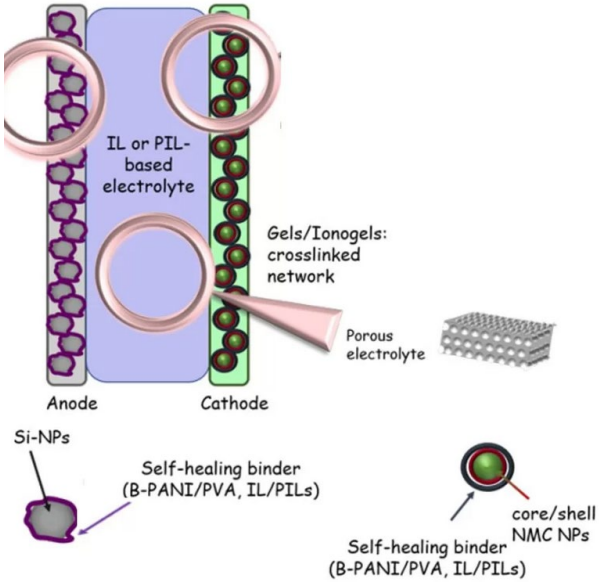


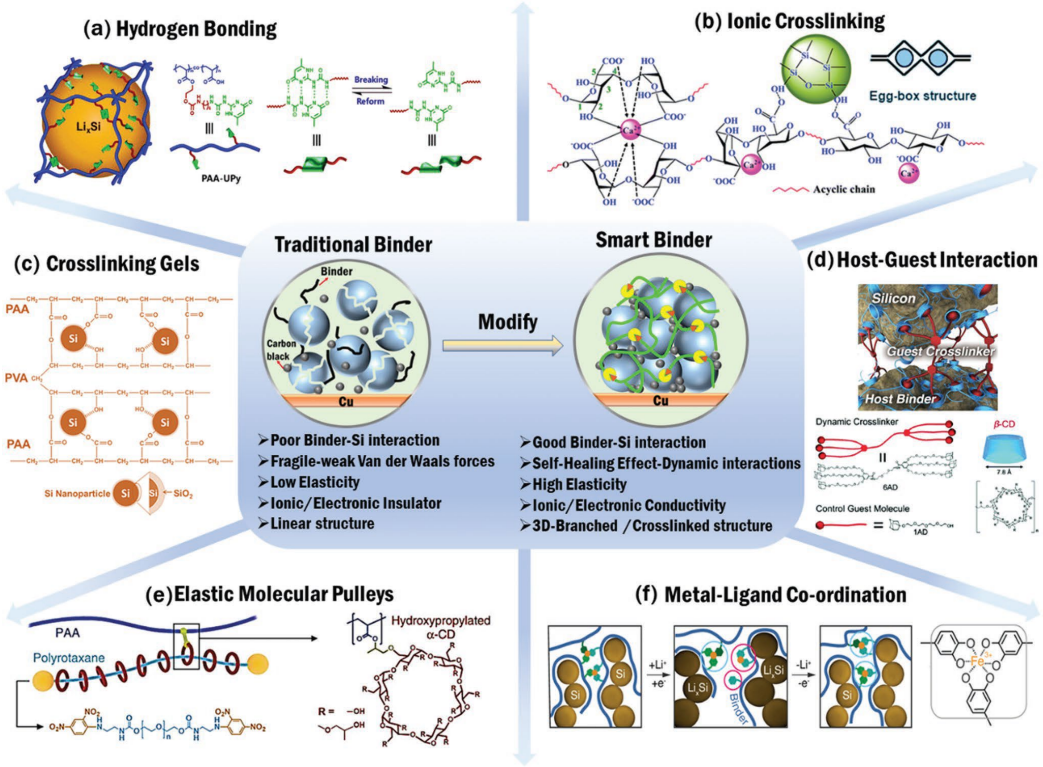




AP 1 - Le stockage électrochimique de l'énergie

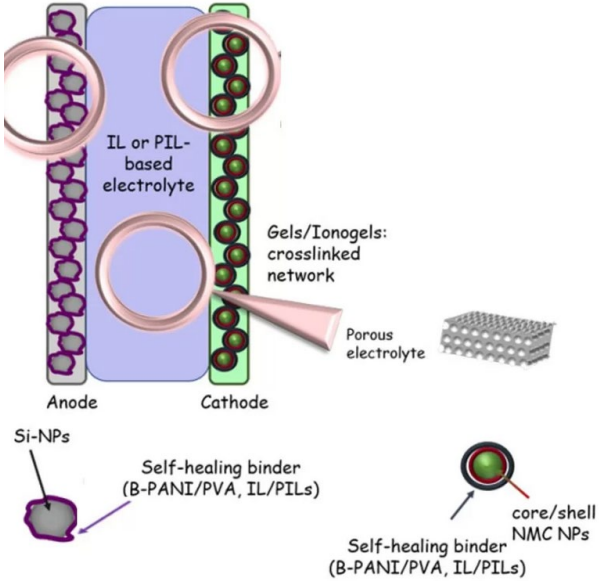
- **L'avenir pour le stockage: « Self-healing »**

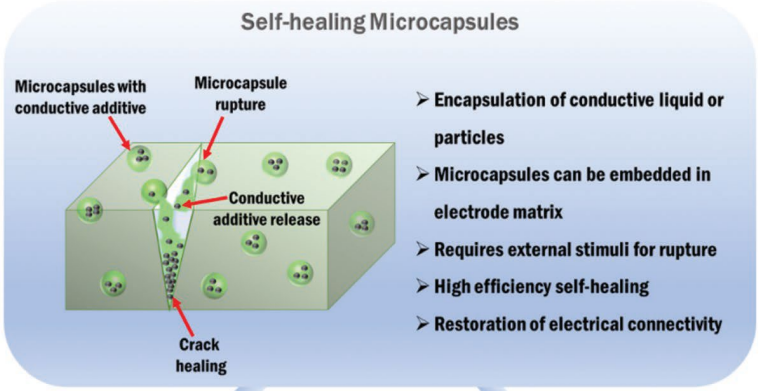




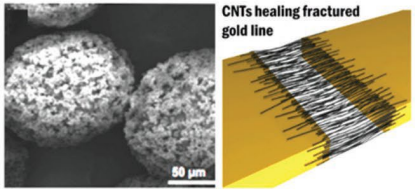
AP 1 - Le stockage électrochimique de l'énergie

- **L'avenir pour le stockage: « Self-healing »**

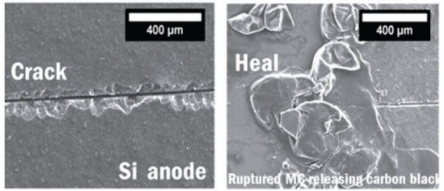




(a) CNT particles filled MCs

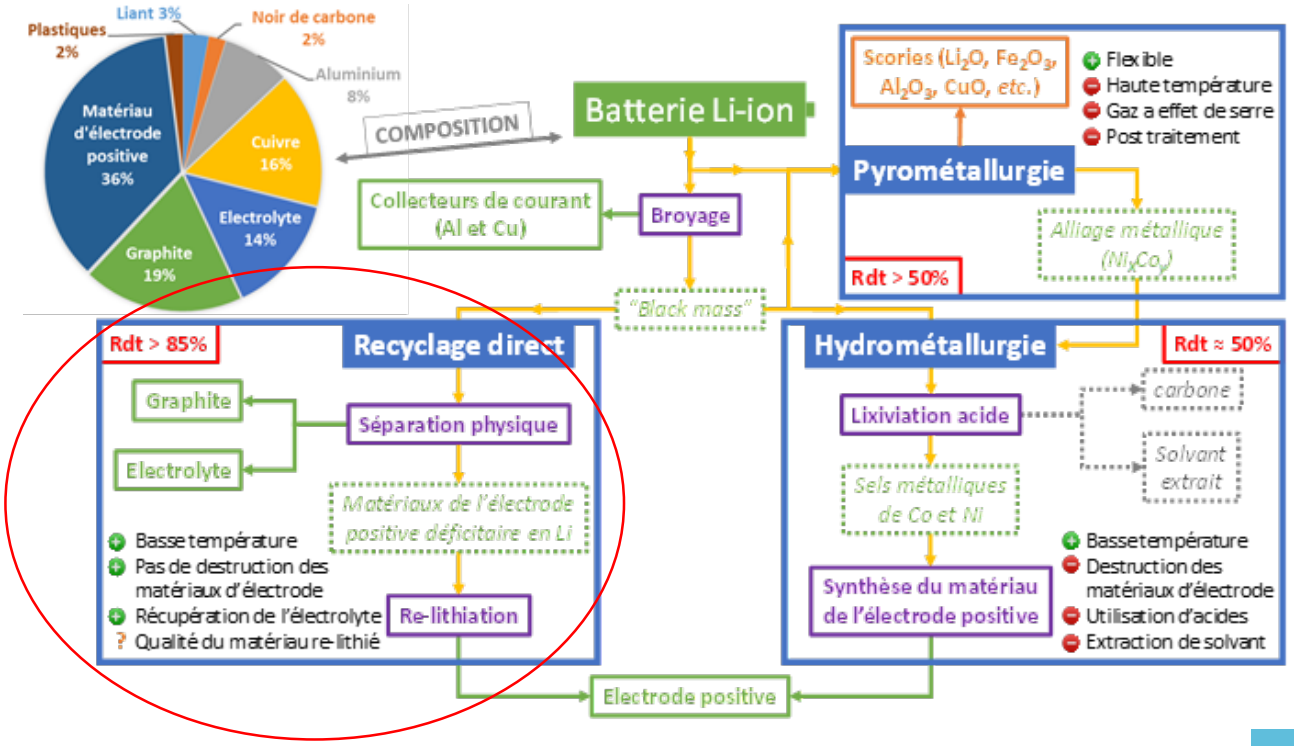


(b) Carbon-Black suspension filled MCs



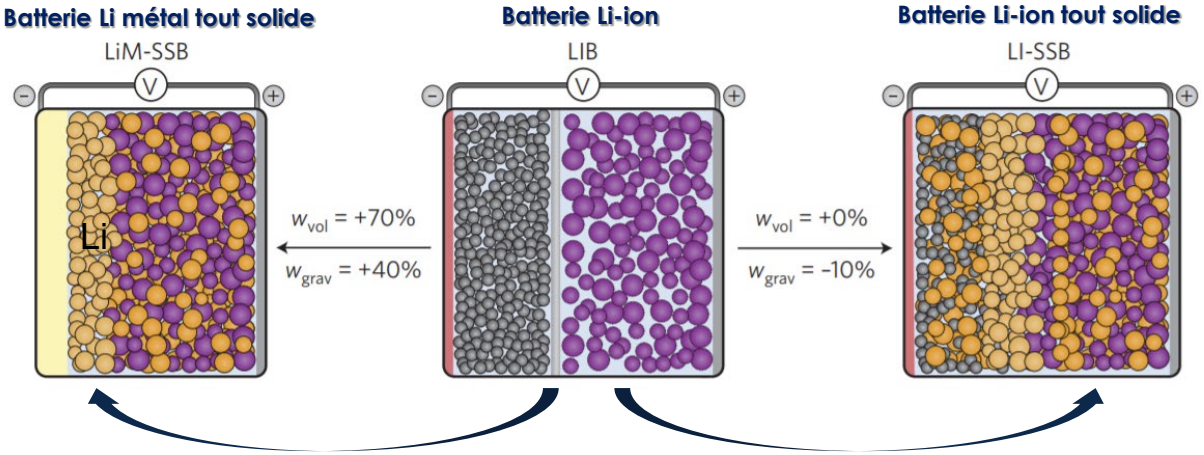
AP 1 - Le stockage électrochimique de l'énergie

- **L'avenir pour le stockage: Recyclage**



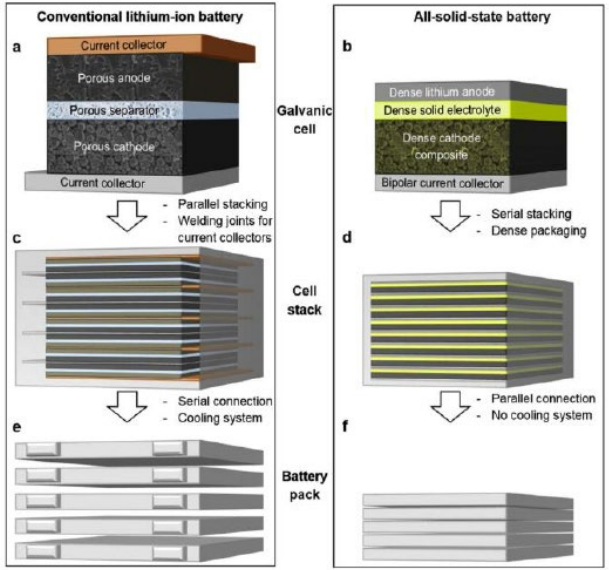
AP 1 - Le stockage électrochimique de l'énergie

- **L'avenir pour le stockage: le « Tout-solide »**



Remplacement du graphite par du Li métal : **augmentation de la densité d'énergie** et **accès à une plus grande variété de matériaux**

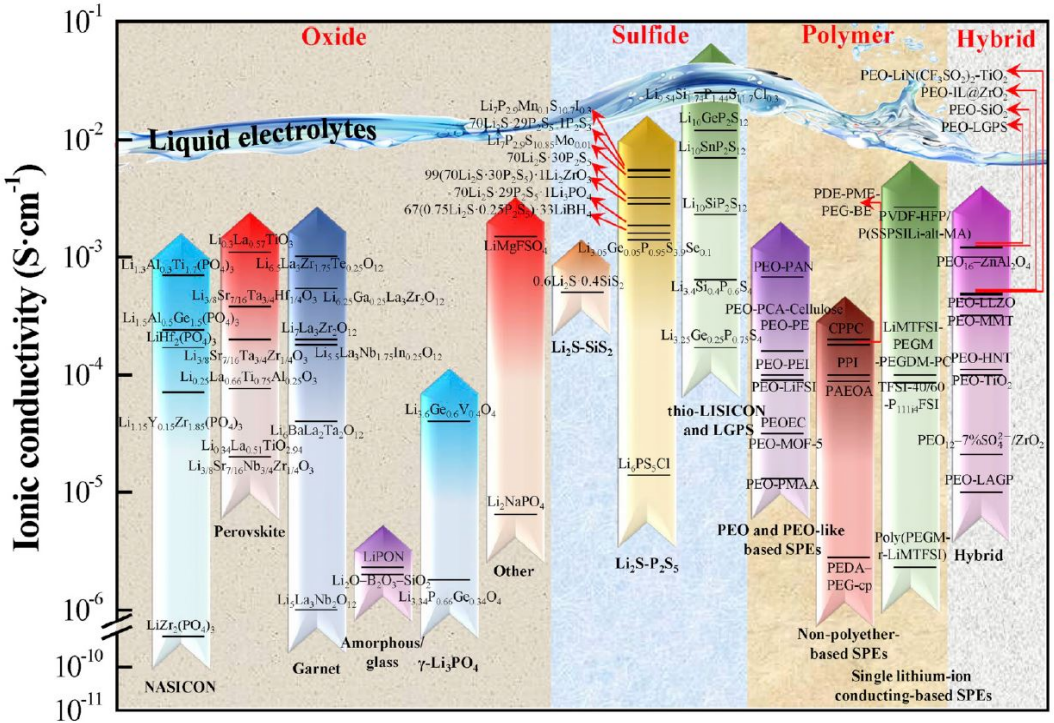
Remplacement de l'électrolyte liquide par un électrolyte solide : **plus de sécurité …**



Janek. J and Zeier. W.G. - *Nature Energy*. (2016)

AP 1 - Le stockage électrochimique de l'énergie

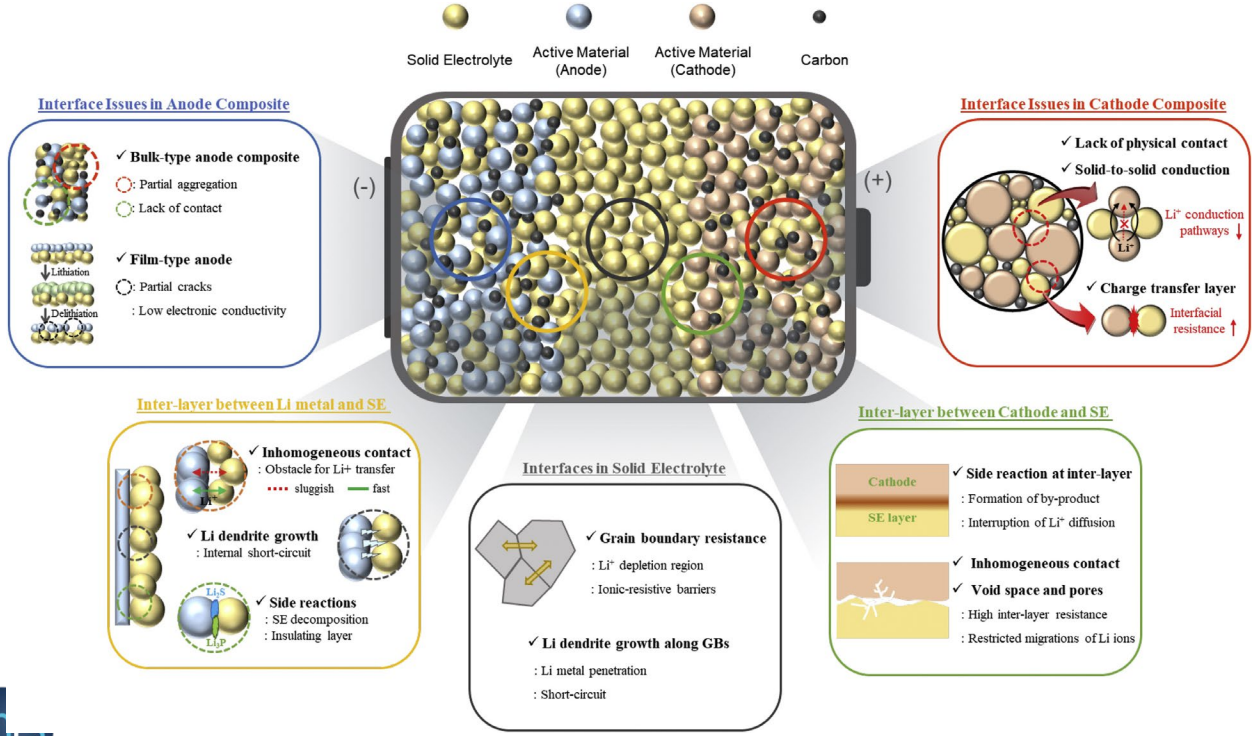
- **L'avenir pour le stockage: le « Tout-solide »**



Wu et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews 109 (2019) 367–385.

AP 1 - Le stockage électrochimique de l'énergie

- **L'avenir pour le stockage: le « Tout-solide »**



Lim, Park, Shin, Jeong, Kim, Nam,... & Chung - *Energy Storage Materials* 2020

Les nouveaux défis :

« Mouillabilité »

Réactivités

Variation de volume

Cohésion

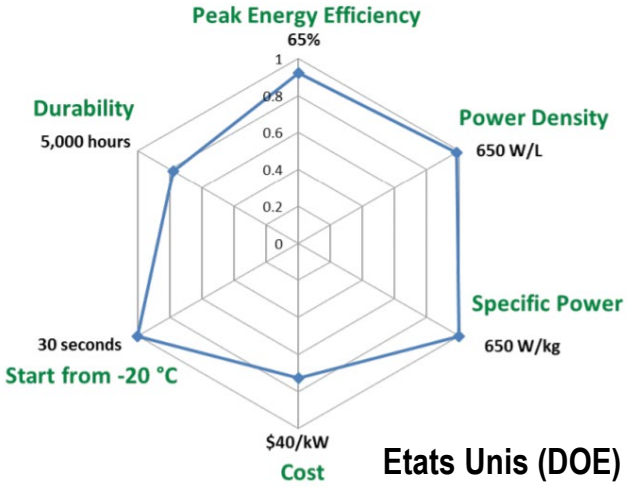
Recyclage

AP 2 – H_2 Pile à Combustibles (H_2PaC)

- **Verrous actuels des systèmes Piles à Combustibles**

No.	Parameter	Unit	State of the art	
			SoA 2012	International SoA 2017*
1	Fuel cell system durability	h	2,500	4,000
2	Hydrogen consumption	kg/100 km	na	1.2
3	Availability	%	95	98
4	Maintenance	EUR/km	na	0.04
5	Fuel cell system cost	EUR/kW	500	100
6	Areal power density	W/cm2	na	1.0
7	PGM loading	g/kW	na	0.4
8	Cell Volumetric power	kW/l	na	5.0

Europe (FCH JU)



Etats Unis (DOE)

Etat de l'art des PEM / véhicules légers (2017)

Verrous actuels (dans l'ordre de priorité):

1. Coût – notamment le cout de fabrication
2. Durabilité – en conditions de fonctionnement réel
3. Performances – garantir une fiabilité, et disponibilité des systèmes

AP 2 – H_2 Pile à Combustibles (H_2PaC)

- **Besoin de recherche à différents niveaux**

TRL	Stack	Système
2-3	Nouvelles générations de stack low-cost: - Densités de puissances + élevées, T de fct + élevées, durabilité et fiabilité améliorées. - Diminution/Pas de Pt. et nouveaux matériaux membranes. - Nouvelles architectures stack (couches catalytiques, canaux de distribution). - Générations de stacks standard, réversibles, briques génériques pour diverses applications. - Stack durable : Recyclage, 2nde vie matériaux, LCA	- Conception de nouveaux composants Système (BoP) low-cost adaptés (humidificateurs, ligne air, etc.) - Nouveaux matériaux pour le Stockage.
3-5	Amélioration de la stabilité des composants et de la tolérance aux impuretés (supports + résistants à la corrosion, membrane + stable chimiquement et mécaniquement).	- Simplification du système - Optimisation des performances électriques/durabilité - Durabilité du système améliorée - Hybridation, électronique de puissance intégrée - Méthodes avancées de gestion de l'Energie
3+	Amélioration des procédés de fabrication, automatisation, diagnostics ligne de production. Protocoles de tests dégradation accélérée	Amélioration des procédés de fabrication, automatisation, diagnostics ligne de production tests de fiabilité/durabilité (AST). Système durable : LCA, 2nde vie Pile à Combustible.

AP 2 – H_2 Pile à Combustibles (H_2PaC)

- **Ambitions – Priorités pour un déploiement de la technologie**

Court terme tous les axes (assez matures) permettant

- de réduire les coûts,

- de faciliter la production de masse : tout ce qui peut faciliter / améliorer / automatiser les techniques de fabrication).

Plus Long terme aller vers la standardisation permet de simplifier les procédés de fabrication et donc d'augmenter les volumes de production qui aura un grand impact sur les coûts.

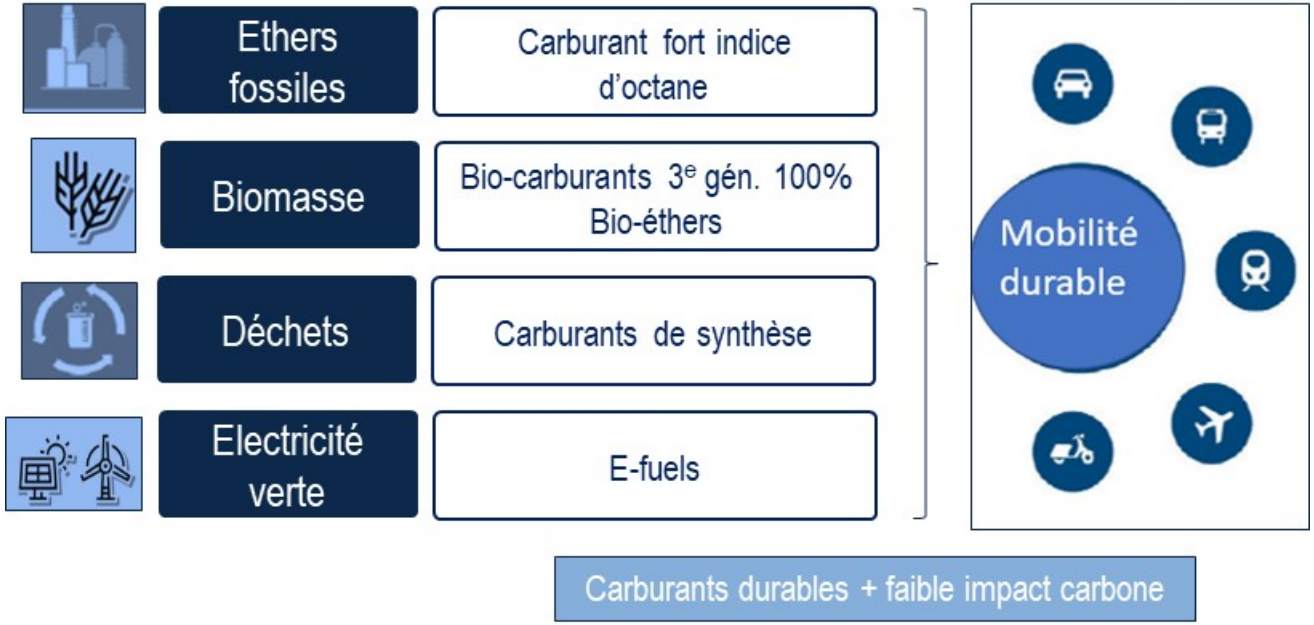
Nouvelles générations de PEM (low-cost, durables, réversibles, briques génériques pour différentes applications).

Aspects SHS/transverse

- Diffusion grand public
- Aspects Normatifs, Sécurité, etc.
- Education / Formation de générations d'experts (techniciens/ingénieurs) permettant d'accompagner l'industrie
- Système Pile à Combustible durable : LCA, 2ème vie, Recyclage.

AP 3 – Carburants durables et combustion zéro carbone

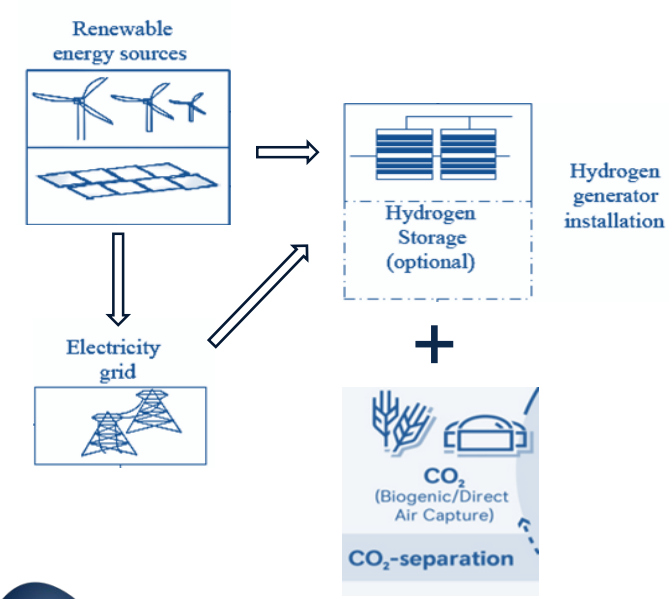
Vers une combustion durable

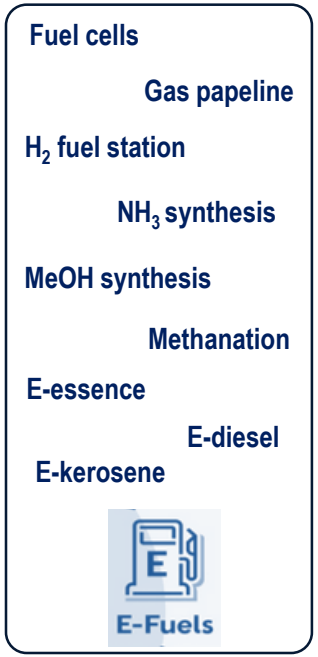


AP 3 – Carburants durables et combustion zéro carbone

Exemple : e-fuels – electrofuels

Green Power To H_2 = pour générer des carburants "durables" sans la problèmatique de charge associée aux véhicules électriques





AP 3 – Carburants durables et combustion zéro carbone

Exemple d'ACV pour le secteur maritime

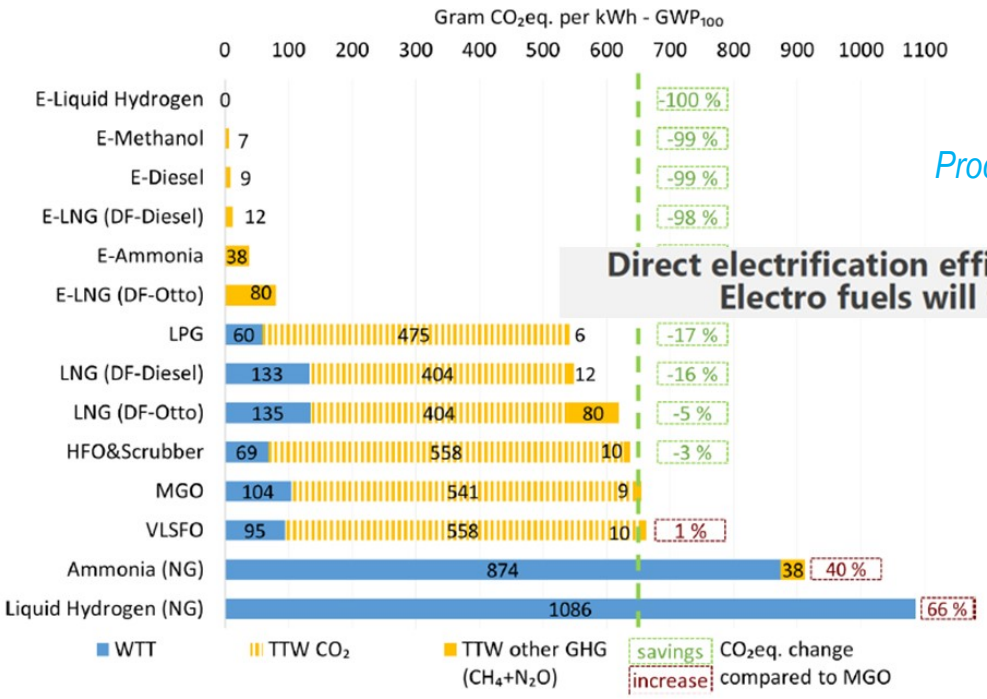


Fig. 2. Well-to-Wake emissions in gram CO_{2eq} per kWh (GWP100).

Procédé Fischer-Tropsch ($CO+H_2$)

Direct electrification efficiently drives the change in transport
Electro fuels will find effective uses in transport

Joint Workshop IEA /European Commission, 10/09/2018

WTT= Wheel to tank
TTW= Tank to wheel

AP 3 – Carburants durables et combustion zéro carbone

Les Challenges de demain

1) Synthèse **EFFICACE** des nouveaux carburants à faible ou zéro impact carbone:
   - Electro-fuels (hydrogène, NH_3, méthanol, carburants de synthèse (XTL))
   - Gaz (bio, synthétique, déchets …)

2) MEILLEURE **ADEQUATION**

   Carburants Zéro-carbone/Bas-Carbone :

   quelle application ? Quelle technologie Moteurs (meilleure architecture, mode de combustion)

   Selon utilisation (automobile, flotte captive, camion, tracteur, engine chantier, aérien, maritime)

3) Optimisation Combustion **OPTIMALE** pour 'nouveaux' carburants

   données expérimentales/modèles/simulations

4) Assurer empreinte environnementale (hors CO_2) minimale **DES MAINTENANT** : Système de dépollution dédiés

5) Gestion optimale de l'énergie selon l'architecture

Conclusions

- De multiples scénarios système « non maîtrisable »
- De nombreuses perspectives sont possibles, mix semble être meilleure option à ce stade
- Besoin de développer les recherches fondamentales et exploratoires sur toutes les technologies
- Outil intégré et multi-échelle de mesure/estimation des impacts environnementaux, sociétaux,…..

ARPEGE MOBILITE DURABLE

Colloque Energie du CNRS

Scénarios énergétiques pour la mobilité durable à l'horizon 2050

07 décembre 2021

Nadia YOUSFI STEINER & Matthieu BECUWE

Les défis de la batterie tout solide (génération 4)

- La **chimie combinatoire** pour la recherche exploratoire de nouveaux électrolytes et l'optimisation de leurs propriétés, avec le développement des outils de caractérisation associés (robotiques)
- **Ingénierie des poudres** pour développer des **morphologies originales** et des **interfaces artificielles**, et stabiliser ainsi chimiquement les interfaces solide-solide
- Développement d'**électrolytes hybrides inorganique - polymère** pour absorber les variations de volume aux interfaces solide-solide …. ou **polymères** bons conducteurs à température ambiante
- Développement de **procédés d'enduction ou d'assemblage de l'empilement solide**
- Développement d'une cellule (casing) adéquate pour **appliquer une pression**
- Développer des **outils de caractérisation *in situ* / *operando* des interfaces**
- Développer les **capteurs pour suivre la batterie et ses composants durant leur cycle de vie**

➡ **Des expertises requises au-delà de celles du chimiste du solide ….**

AP 2 – H_2 Pile à Combustibles (H_2PaC)

- **Objectifs horizon 2025/2030**

No.	Parameter	Unit	State of the art		FCH 2 JU target		
			SoA 2012	International SoA 2017*	Target 2020	Target 2024	Target 2030
1	Fuel cell system durability	h	2,500	4,000	5,000	6,000	7,000
2	Hydrogen consumption	kg/100 km	na	1.2	1.15	1,1	1
3	Availability	%	95	98	98	99	>99
4	Maintenance	EUR/km	na	0.04	0.03	0.02	0.01
5	Fuel cell system cost	EUR/kW	500	100	60	50	40
6	Areal power density	W/cm2	na	1.0	1.5	1.8	2.0
7	PGM loading	g/kW	na	0.4	0.17	0.08	0.05
8	Cell Volumetric power	kW/l	na	5.0	7.3	9.3	10.0

SoPHY 2024

> 7000h

<100€/kW*

= 6kW/L

* Coût Stack @10kunités/an