

## Autorail à Hydrogène ALSTOM

### Sur le Coradia iLint, la pile à hydrogène remplace le diesel

Depuis quelques semaines, la sortie d'un autorail ALSTOM en Allemagne fonctionnant à l'hydrogène, occupe beaucoup les conversations.

Comme d'habitude, beaucoup d'élus, prêts à sauter à pieds joints sur la moindre nouveauté, s'enflamment, et sans rien y connaître, décrètent que le Graal de la transition énergétique, c'est à dire l'Hydrogène, va rapidement s'imposer dans les transports.

Récemment, au cours d'une réunion dans les locaux de RFF à Marseille, alors que nous évoquions de possibles électrifications de lignes souhaitables en PACA, n'avions nous pas rencontré 2 ingénieurs qui nous répliquèrent, le plus sérieusement du monde :

**" Les électrifications ? C'est fini !  
Les trains vont s'électrifier eux mêmes grâce à l'Hydrogène ! ".**

Il est donc facile de comprendre pourquoi la sortie de cet autorail ALSTOM a pu échauffer les esprits à ce point.

#### La gamme des Autorails diesels ALSTOM Lint

Cette large gamme d'autorails Lint ( "*Leichter Innovativer Nahverkehrstriebwagen* » , soit en français : « autorail léger innovant de transport local »), a été conçue par l'entreprise allemande Linke-Hofmann-Busch (LHB), rachetée par ALSTOM, laquelle poursuit les fabrications sous le nom de ALSTOM Coradia.

Les autorails sont déclinés en plusieurs versions, la dénomination reprenant la longueur des véhicules.

#### ALSTOM Lint 27

Autorail à caisse unique de 27,26 m, série 640 à la Deutsche Bahn, il comporte un unique moteur diesel de 315 kW fixé sous la caisse, entraînant les 2 essieux d'un seul bogie par l'intermédiaire d'un arbre à cardan et un pont moteur, ce qui donne une configuration B'2'.

Vitesse 120 km/h, 52 places en 2e classe, 8 en 1re classe + 13 strapontins.

C'est un peu l'équivalent de nos X 73500, mais ce dernier dispose de 2 moteurs délivrant au total 514 kW, ce qui le rend bien plus apte à grimper les rampes de 25 ‰ sur Grenoble - Gap ou Briançon.



## ALSTOM Lint 41

Rame à **deux caisses articulées** de 41,89 m, série 648 à la Deutsche Bahn. Chaque caisse comporte un moteur diesel de 315 kW fixé sous la caisse, entraînant les 2 essieux du bogie coté cabine, par l'intermédiaire d'un arbre à cardan et un pont moteur, ce qui donne une configuration B' (2') B' , donc 2 bogies moteurs. Vitesse 120 km/h, 52 places en 2e classe, 8 en 1re classe + 13 strapontins.



## ALSTOM Lint 54

Rame à **deux caisses sur 4 bogies** de 54,27 m, série 622 à la Deutsche Bahn. Une caisse comporte un moteur diesel de 390 kW fixé sous la caisse, entraînant les 2 essieux du bogie coté cabine, par l'intermédiaire d'un arbre à cardan et un pont moteur, configuration B' 2' . L'autre caisse comporte 2 moteurs diesel de 390 kW, donc 2 bogies moteurs, configuration B'B' , ce qui donne au total une configuration B'2' + B'B' , donc 3 bogies moteurs.

Vitesse 140 km/h.

Une version Erixx ne comporte que 2 moteurs, ce qui donne la configuration B'2' + 2'B' , **dont est justement extrapolé l'autorail à hydrogène.**

## ALSTOM Lint 81

Rame à **trois caisses sur 6 bogies** de 80,92 m, série 620 à la Deutsche Bahn. Il possède 4 moteurs diesel de 390 kW, selon la configuration B'2' + B'2' + B'B' (4 bogies moteurs).

Vitesse 140 km/h.



Claude JULLIEN - FNAUT-PACA - Autorail à Hydrogène ALSTOM Coradia iLint  
( Réf : 137CJ - Indice A le 30-04-2018 )

Références : revue "Chemins de Fer" N° 569 - Avril 2018

# L'Autorail à Hydrogène ALSTOM Coradia iLint



ALSTOM a dévoilé son autorail zéro émission (à condition que la production d'Hydrogène le soit également) au Salon InnoTrans qui s'est tenu à Berlin du 20 au 23 septembre 2016.

Il est extrapolé du modèle Lint 54 à 2 bogies moteurs, donc de configuration B'2' + 2'B' , disposition peu favorable à l'adhérence.

La vitesse est restée de 140 km/h.

Ce qui nous intéresse avant tout, c'est la nouvelle chaîne de traction afin de connaître les performances de cet autorail.

À noter que cet autorail devait obligatoirement comporter 2 caisses, pour une répartition uniforme des masses sur les essieux. Tous les appareillages sont en double et uniformément répartis entre chaque caisse : piles à combustible, moteurs électrique, convertisseurs, réservoirs à hydrogène, groupes de climatisation, mais une caisse abrite le convertisseur auxiliaire, l'autre la batterie qui a une importance cruciale dans cette chaîne de traction.

La page suivante donne la disposition des appareils, ainsi que le schéma électrique de la rame, avec les puissances correspondantes.

## Stockage de l'Hydrogène

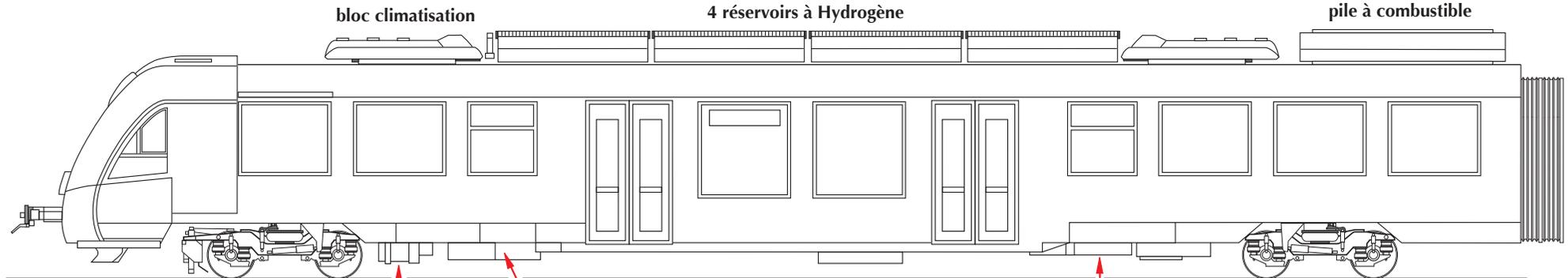
C'est bien connu, la matière est pleine de vide, et vouloir emprisonner dans un réservoir la molécule la plus légère de l'univers pose un vrai problème technique.

Un réservoir ne gardera pas l'Hydrogène pour l'éternité, mais sur notre autorail, les recharges presque journalières pallieront à la porosité des parois.

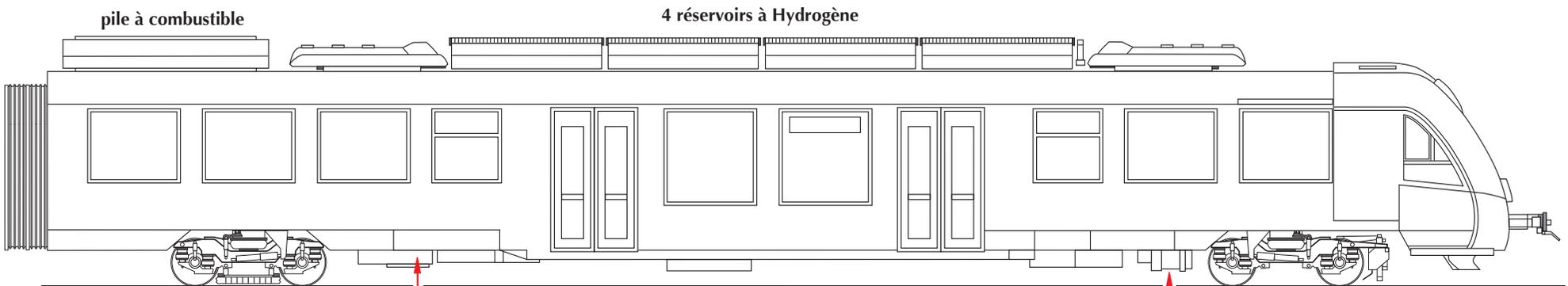
Pour avoir une autonomie suffisante, il faut embarquer la masse de gaz la plus élevée possible, et comme celui-ci est très léger, il faudra utiliser des pressions hors du commun.

La sécurité impose de placer les 8 réservoirs en toiture. En cas de fuite, ce gaz très inflammable et très léger, s'échappera dans l'atmosphère.

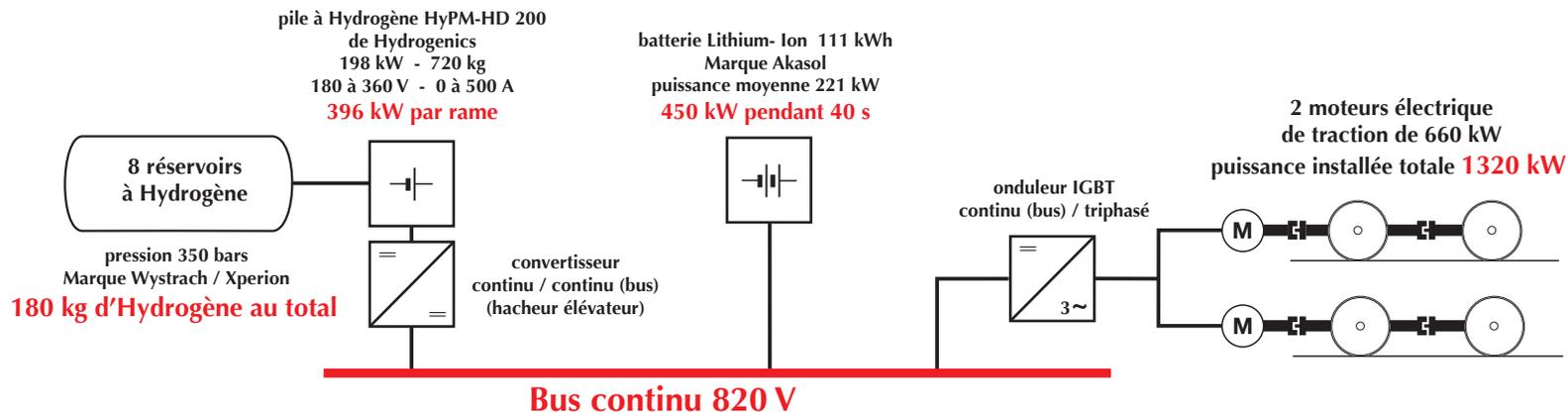
# Autorail à Hydrogène ALSTOM Coradia iLint



moteur électrique de traction  
 convertisseur continu / continu (bus) + onduleur de traction continu (bus) / alternatif triphasé  
 convertisseur auxiliaire



un seul bogie équipé de patins de frein électromagnétique  
 batterie 111 kWh  
 moteur électrique de traction



En ce qui concerne l'autorail iLint , nous aurons 8 réservoirs à 350 bars de marque Wystrach / Xperion, pouvant stocker **180 kg d'Hydrogène**.

Le rechargement des réservoirs s'effectue en 15 minutes environ.

La traction par Hydrogène est actuellement également expérimentée sur des autocars, mais l'impossibilité de monter à bord des masses importantes, fait que cette technique est beaucoup plus contrainte que sur un train. C'est ainsi que pour obtenir une autonomie d'environ 1000 km, on utilisera des réservoirs à 700 bars ! Pour atteindre des pressions de conditionnement aussi élevées, il faut encore consommer de l'énergie.

Une voie d'avenir pourrait être le stockage de l'Hydrogène sous forme solide, combiné dans des hydrures métalliques.

## Puissance des piles à combustible de l'autorail

Le principe de la pile à hydrogène est assez ancien : **1839** , découverte de l'effet pile à combustible par l'allemand **Christian Schönbein**.

Ce genre de générateur est en général réservé à des applications très particulières, car contenant des métaux précieux, il est fort cher.

La rame est équipée de 2 piles à Hydrogène (une par caisse), placée en toiture, ce qui améliore la sécurité. Chaque pile, de type HyPM-HD 200, de marque Hydrogenics, a une puissance nominale de 198 kW,

**soit 396 kW pour la rame,**

valeur très faible qui nous ramène à l'époque des dernières Caravelles, lesquelles étaient équipées de petites caisses, et donc plus légères.

À noter qu'un X 73500 monte à 514 kW pour une seule caisse de 50 t.

Les performances de la rame iLint ne s'annoncent donc pas très brillantes.

## Chaîne de traction électrique

Voir schéma.

La chaîne de traction est relativement originale, car au regard de la faible puissance des piles à Hydrogène, ALSTOM a eu le souci d'essayer de la compenser grâce à une importante batterie Lithium - Ion.

Une fois produite par la pile à combustible, l'électricité est utilisée de manière classique, sauf que les fortes variations de tension de la pile (entre 180 et 360 V) imposent la présence d'un hacheur élévateur régulateur intermédiaire pour produire la tension du Bus à 820 V continu, la plus régulée possible.

De là, un onduleur à IGBT produit le courant triphasé nécessaire aux 2 moteurs électriques asynchrones.

Avec une puissance crête de 396 kW à la sortie des piles, notre autorail offrirait des performances assez médiocres. Toutefois, on sait que les véhicules ferroviaires, une fois atteinte une certaine vitesse, ne demande pas des puissances très élevées pour s'y maintenir, résultat de la faible résistance à l'avancement du contact roue-rail, et d'une inertie assez importante.

Ainsi, le train Capitole Paris-Toulouse se maintenait aux alentours de 200 km/h avec environ 2000 kW.

Le problème de la puissance est donc une histoire de forte consommation d'énergie au démarrage, la puissance continue des piles de 396 kW (moins tous les rendements de la chaîne) pouvant laisser espérer que l'autorail conservera la vitesse acquise.

Pour ce faire, ALSTOM a rajouté une importante batterie Lithium - Ion, capable de donner une "pichenette" au démarrage, c'est à dire **450 kW pendant 40 s** !

La puissance théorique au démarrage devient alors :

**396 kW (piles) + 450 kW (batterie) = 846 kW !** pendant 40 s

On retrouve une puissance plus en rapport avec les matériels ferroviaires classiques, mais il faut que l'autorail ait atteint sa vitesse maximale si possible avant 40 s, sinon, les accélérations à venir, si c'est encore possible avec 396 kW, seront particulièrement poussives !

Autant nous connaissons de manière certaine la puissance continue des piles, autant l'état de la charge de la batterie peut poser problème, et cela peut influencer de manière considérable les performances de l'autorail. On profitera donc du moindre freinage pour recharger les batteries.

## Les 2 moteurs de traction électrique

Avec une puissance de 660 kW pour chacun d'eux, soit 1320 kW en tout, la puissance installée n'a rien à voir avec celle que peut fournir l'ensemble pile à combustible + batterie.

En fait, ALSTOM a du choisir ces moteurs sur étagère dans sa propre gamme, ce qui illustre bien la très bonne puissance massique des moteurs de traction triphasés Asynchrone, bien plus légers et bien plus robustes que nos antiques moteurs à collecteurs.

Les moteurs sont suspendus sous la caisse, et non pas placés dans les bogies comme sur la majorité des rames électriques. Les moteurs sont donc entièrement suspendus, reliés aux essieux par un arbre à cardan. On voit bien dans cette disposition la filiation avec le modèle Lint 54.

Mais ALSTOM possède aujourd'hui une bonne expérience des moteurs Synchrones à aimants permanents, ce qui pourrait être une évolution future du Coradia iLint. [1]

## Le freinage

C'est une phase très importante du cycle de traction, car on en profitera pour récupérer le maximum d'énergie pour recharger la batterie.

En théorie 1/2 mV2, moins les rendements, et les batteries ont toutes un mauvais rendement.

Le freinage mécanique, indispensable pour la sécurité, est minimisé au maximum. Un seul bogie possède des patins de frein électromagnétique.

## La batterie Lithium - Ion

La batterie de cet autorail remplit un rôle considérable dans l'amélioration des caractéristiques de traction.

En raison des appels de puissance intermittents, la technologie de la batterie ne pouvait être que de 2 types : au plomb ou au Lithium.

Le Cadmium - Nickel est inadapté à ce régime intermittent, car en raison de "l'effet mémoire", il n'y a pas de recharges intermédiaires possibles, il faut à chaque fois décharger complètement la batterie.

Donc, totalement inadapté au problème de notre autorail.

La batterie au plomb est intéressante pour son prix, mais le plomb ... c'est lourd !

Admissible sur un gros bateau, mais déconseillée sur un mobile tel qu'un train, encore plus déconseillée sur un autocar. Et la fabrication des batteries au plomb, mais également leur récupération et traitement après usage, est très polluant.

Et puis, la grande mode dans l'automobile, c'est bien le Lithium, produit miracle qui seul a permis l'émergence de véhicules entièrement électriques, mais pas s'en poser d'autres problèmes par ailleurs.

Sur notre autorail, la batterie, de marque Akasol, offre 111 kWh, et il est facile de comprendre que face aux "pichenettes" de 450 kW pendant 40 s, il faut gérer les recharges très finement à chaque freinage.

La batterie offre aussi une puissance moyenne continue de 221 kW, mais on comprend bien que face à la capacité initiale, cette puissance moyenne ne durera pas longtemps (en théorie, moins de 50 minutes), d'autant qu'en se déchargeant, la puissance délivrée n'est pas linéaire, mais de plus en plus faible.

Et puis, il faut choisir, soit une puissance moyenne continue, soit une "pichenette".

## L'Hydrogène

À en écouter certains, l'hydrogène est la solution d'avenir, en particulier chez les élus, toujours prompts à foncer dans la nouveauté pour épater l'électeur, et si possible en oubliant les solutions parfaitement éprouvées et fiables depuis plus de 100 ans.

Malheureux tramway, presque entièrement disparu de France après la seconde guerre mondiale, mais pourtant tellement plébiscité dans le monde entier. Voir annexe sur l'Hydrogène.

## Les bogies

Les 4 bogies de cet autorail nous rappellent étrangement ceux du X 73500, avec un primaire avec des boîtes à bras équipé de ressorts "Clutch", et un secondaire avec un coussin pneumatique.

---

[ 1 ] ALSTOM équipe avec des moteurs synchrones à aimants permanents tous les Tramways Citadis, les Tram-Train Dualis, toute la gamme Régiolis, l'AGV.

À noter que la rame TGV qui a battu le record du monde à 575 km/h, était équipée de 2 bogies moteurs supplémentaires équipés de ces moteurs.

Comme le X 73500 SNCF est très confortable, nous pourrions en conclure qu'il en sera de même pour l'autorail allemand, mais nous n'avons pas roulé dans le Coradia iLint et donc nous réservons notre jugement, car chat échaudé craint l'eau froide.

Ainsi, en observant de plus près la suspension du X 72500, tout est réuni pour un confort optimal : primaire avec des boîtes à bras totalement identique à celui des bogies Y 32 qui équipent les voitures Corail, secondaire pneumatique qui présage une suspension agréable, et pourtant, quelle déception !

Le choix du coussin pneumatique est mauvais, trop souple en latéral, le bogie "tape" sur les butées latérales dans les courbes, ce qui donne l'impression d'une pose de la voie polygonale.

La conception des bogies est une science, et malgré tous les enseignements que l'on a pu tirer de divers matériels depuis 40 ans, on voit encore de magnifiques "ratés" sur des matériels neufs, même en 2018 !

Un seul bogie de la rame iLint est équipé de patins de frein électromagnétique.

## Commentaires sur l'autorail iLint

Le problème principal est avant tout la faible puissance des piles à combustible.

Bien entendu, on va immédiatement nous rétorquer : "C'est une première application, les puissances vont augmenter, etc ...". Certes, mais il existe une quasi obligation de placer les piles en toiture, comme les réservoirs, et le gabarit ferroviaire à des limites.

Dans un article paru récemment, l'auteur s'interrogeait : " ALSTOM propose cet autorail en Allemagne, surtout dans le Nord, au Danemark et aux Pays-Bas, et curieusement, pas en France ! ".

En résumé, uniquement dans le " plat pays ! ".

Avec une pareille puissance, on voit mal ce genre de rame monter à Briançon ou à Tende, alors que l'autorail SNCF X 73500 affronte correctement les rampes de 25 de l'Étoile de Veynes ! [2]

Quel service l'autorail iLint pourrait-il assurer en PACA sur des lignes non électrifiées ?

La Côte Bleue, St-Auban - Digne, Carnoules - Gardanne, Avignon - Carpentras (et encore, cette dernière ligne mérite un Tram-Train électrique à court terme).

## L'approvisionnement en Hydrogène

Le problème de l'approvisionnement en Hydrogène reste entier, et il n'est pas certain qu'un généreux mécène industriel puisse fournir les excédents de sa production, comme en Allemagne, sans éluder la question : **y en aura-t-il pour tout le monde ?**

S'il faut passer par les schémas classiques de la production d'Hydrogène, économiquement notre autorail est condamné, c'est hors de prix, et les rendements sont déplorables.

### Hydrolyse de l'eau

Le rendement "du puits à la roue" est déplorable, et cela coûte très cher. Il vaut mieux utiliser l'électricité de manière directe. Si l'électricité est produite pas des ENR, c'est encore pire, et particulièrement dommageable pour les finances des usagers de l'EDF (voir récent rapport de la Cour des Comptes).

Si l'électricité est produite par une centrale à charbon (heureusement, plus en France), où est l'autorail "zéro émission" ? On oublie un peu vite que l'Allemagne continue de consommer du lignite en grande quantité, la pire saloperie écologique.

### Reformage du Méthane

C'est actuellement le mode de production privilégié à plus de 90 %, avec 54 milliards de m3 par an dans le monde, mais on a alors la vague impression que **l'on ne quitte pas vraiment les énergies fossiles**, que l'on aurait au contraire intérêt à utiliser directement.

### Où est alors l'autorail "zéro émission" ?

Si l'on fait le bilan énergétique de cette production, le basculement vers l'hydrogène provoque un gaspillage d'énergie, mais également une accélération de consommation d'énergie fossile.

L'hydrogène ne devient qu'une mauvaise utilisation du méthane !

La société SOLVAY vient d'inaugurer sur le port d'Anvers l'une des plus grandes usines du monde de production d'Hydrogène par reformage du méthane. Compte tenu des problèmes de stockage d'Hydrogène, elle a cherché à réutiliser au plus vite les surplus de production, et pour ce faire, a mis en service une pile à hydrogène de 1 MW qui débite du courant sur le réseau belge.

---

[ 2 ] Bien que la SNCF a osé envoyer des Caravelles de 425 CV jusqu'à Tende, et même Coni, sans éprouver aucune honte devant les Italiens.

On peut considérer que dans ces conditions, l'hydrogène en surplus est vendu à un prix intéressant, mais peut-on compter systématiquement sur ce genre de situation bénéfique pour alimenter le fort développement de la filière que certains nous promettent ?

Certainement pas. Il faut donc considérer le vrai coût de l'hydrogène, qui en moyenne, est très élevé si elle est produite spécifiquement pour des mobiles ferroviaires ou routiers.

Avertissement gratuit vers les élus français, prêts à basculer sans grande réflexion vers ce vecteur.  
N'est-ce pas, messieurs les élus du Var ?

## Sur les piles à combustible

Nul doute qu'elles feront encore quelques progrès, que leur puissance volumique ou massique va un peu s'améliorer, mais le problème n'est pas là.

C'est **une solution de "gosse de riches"**, c'est à dire qu'au vu des matériaux précieux et de certaines terres rares qui entrent dans la composition d'une pile à combustible, "**il n'y en aura pas pour tout le monde !**", et si cette solution devait connaître un fort développement, les métaux précieux deviendraient encore plus précieux, et les terres rares encore plus rares.

## Sur les batteries au Lithium

Problème strictement identique aux piles à combustible, sauf que certains bâtissent des plans sur la comète - en particulier dans l'automobile - qui font que le calendrier du grand saut vers la pénurie sera encore plus court.

## Valeur d'usage de l'autorail Coradia iLint

Le développement de la vente des voitures électriques a permis l'émergence d'un coût plus ou moins caché, la faible durée de vie des batteries !

Ainsi, le propriétaire d'une voiture électrique devra prévoir au minimum, au cours de la vie réelle de la voiture, le changement complet du jeu de batteries. Mais la durée de vie réelle d'une voiture électrique est de combien d'années ? Pas de boîte de vitesse, pas d'embrayage, pas de vidange, un moteur électrique indestructible, et si le propriétaire appartient à la catégorie des gens qui gardent longtemps leur voiture, ce sera sans aucun doute plus de 2 jeux de batteries qu'il faudra prévoir.

Notre autorail est dans la même situation, sauf que la durée de vie des matériels ferroviaires est plutôt de 30 ans (minimum, valeur généralement fixée par l'amortissement comptable), mais bien souvent 40 ans, voire plus.

Même problème pour la durée de vie des piles à combustibles : combien d'années ?

Pour les automobiles, la durée de vie correspond sensiblement à 100 000 km, mais ACAL Energy annonce 8000 heures et 300 000 km pour bientôt !

C'est encore très loin des matériels ferroviaires, avec certains autorails qui dépassent allègrement les 5 ou 6 millions de km, mais dans ce dernier cas, le remplacement pourrait devenir un avantage (**à condition de payer**) avec des piles qui deviendraient de plus en plus puissantes au fil des années !

## La fin des électrifications ?

Pour en revenir à la réflexion de nos 2 ingénieurs de RFF cités au début de ce document, nous sommes loin de la coupe aux lèvres :

- manque de puissance des matériels Hydrogène, et pour le moment, pas de locomotive
- prix élevé de l'Hydrogène
- mauvais rendement global du "puits à la roue", même en cas de passage par les ENR avec électrolyse, financièrement catastrophiques

Dans le cas de nos lignes secondaires non électrifiées en PACA, majoritairement en montagne avec des rampes pouvant atteindre 25 %, le manque de puissance est rédhitoire.

L'extension des électrifications, très souhaitable dans le cas de Veynes - Briançon, se heurte aux devis SNCF, totalement déconnectés des réalités économiques des autres pays européens.

Une bonne solution intermédiaire à court et moyen terme serait le basculement des matériels diesels vers le gaz, vraisemblablement le GNV.

Mais au vu de la quasi généralisation des nouveaux matériels TER bimodes - bi-courants, **la solution électrification par étapes** n'est pas à écarter. Ainsi, l'Étoile de Veynes pourrait bénéficier d'une électrification progressive, par exemple par étapes de 30 km par an en 25 kV, en commençant par la Freissinouse.

## Pour les lignes comportant des rampes élevées, l'électrification reste la solution la plus appropriée !

# Annexes

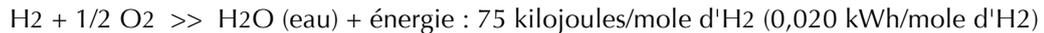
## L'hydrogène n'est pas une source d'énergie, c'est un vecteur, tout comme l'électricité.

Il n'existe pas de manière naturelle sur Terre [ 3 ].

Cela pour deux raisons :

- Si l'hydrogène gazeux ( $H_2 = H-H$ ) fut présent dans l'atmosphère terrestre peu après la formation de la Terre, il y a 4,5 milliards d'année, il s'est très rapidement échappé dans l'espace [ 4 ].
- L'hydrogène est un élément extraordinairement réactif et donc **très exothermique**, c'est à dire qu'il donne un très grand dégagement d'énergie en se combinant avec l'oxygène ( $O_2$ ), en particulier, mais aussi avec le carbone (C), pour donner de l'eau ou des hydrocarbures dont le plus simple est le méthane ( $CH_4$ ).

Ce qui donne :



C'est bien pour cela que l'on prétend que l'hydrogène pourrait servir de source d'énergie.

Cette réaction peut, par exemple, être utilisée dans une pile à combustible pour produire de l'électricité ou tout simplement comme combustible.

L'hydrogène est donc devenu très rare dans l'atmosphère terrestre (0,55 ppmv).

## Différence avec l'hydrogène, l'électricité ne se stocke pas, ou très peu,

et à des coûts financiers et environnementaux très élevés.

Au demeurant, le stockage de l'hydrogène pose des problèmes non négligeables et difficiles à résoudre, en particulier parce que pour ce gaz, le plus léger et le plus ténu des éléments chimiques, tous les matériaux se révèlent poreux.

C'est d'ailleurs l'un des problèmes soulevé à propos d'ITER, qui pose la possibilité de bien contenir le tritium, isotope de l'hydrogène de masse 3, alors qu'il fuit à travers les pores de tous matériaux selon racine carré (3) = 1,73 fois moins facilement que l'hydrogène ordinaire.

Par combustion ou dans une pile à hydrogène, l'hydrogène peut donner au maximum, mais en fait moins à cause du rendement toujours inférieur à 100 % :



Il faut d'abord, avoir produit l'hydrogène, par exemple par hydrolyse de l'eau à l'aide d'énergie électrique, soit théoriquement :



On finit par obtenir moins d'énergie avec la pile à combustible, que l'on en a dépensé pour produire l'hydrogène nécessaire pour alimenter ladite pile, à cause des rendements toujours inférieurs à 100 %.

### En résumé, un modèle typique d'utilisation de l'hydrogène, c'est :

- Électrolyse de l'eau avec une **dépense d'énergie E** pour produire de l'hydrogène
- Utilisation de cet hydrogène dans une pile à combustible avec **production d'une énergie électrique inférieure à E**.

Les meilleures piles à hydrogène atteignent des rendements très variables selon la gamme de puissance, et il ne faut pas oublier les températures de fonctionnement, pouvant être un problème sur un véhicule.

Dans la gamme commercialisée :

- 10 à 100 kW, rendement 60 / 70 %, température jusqu'à 90 °C
- 100 à 500 kW, rendement 55 %, température jusqu'à 220 °C, **c'est la gamme de notre autorail**

En cours de développement, au stade de prototype expérimental :

- jusqu'à 10 MW, rendement 55 %, température jusqu'à 220 °C
- jusqu'à 100 MW, rendement 55 %, température jusqu'à 650 °C, **non embarquable**

[ 3 ] Bien que suite à des découvertes récentes, de l'Hydrogène sortirait en petite quantité de failles sous-marines profondes

[ 4 ] À cause de :

- l'agitation thermique (mouvement Brownien) de ses molécules de grande célérité moyenne (1 845 m/s) et de grand libre parcours et  
- du fait que l'atome d'hydrogène étant l'élément de plus faible masse atomique, soit 1, et donc que la masse molaire de l'hydrogène gazeux soit 2, l'hydrogène n'a pu être retenu sur la Terre par le champ de gravitation terrestre ou champ de pesanteur.

Claude JULLIEN - FNAUT-PACA - Autorail à Hydrogène ALSTOM Coradia iLint

( Réf : 137CJ - Indice A le 30-04-2018 )

Références : revue "Chemins de Fer" N° 569 - Avril 2018

## Les énergies renouvelables

L'électrolyse de l'eau par utilisation d'électricité en provenance des ENR est-elle intéressante ?

Que l'on pense simplement qu'actuellement le coût de production de l'électricité photovoltaïque oscille entre 220 et 400 à 600 euros/mégawattheure (MWh) (0,22 et 0,40 à 0,60 euro/kWh), alors que le prix moyen de vente en gros de l'électricité sur le marché européen de l'énergie, *PowerNext*, est d'environ 55 euros/MWh (0,055 euro/kWh).

L'entreprise nationale EDF est obligée de revendre 25 % de sa production annuelle totale d'électricité à ses concurrents privés (en fait presque tout à Suez), au prix de 42 euros/MWh (0,042 euro/kWh), Suez exigeant, d'ailleurs, qu'EDF baisse ce prix de vente au moins à 39 euros/MWh (0,039 euro/kWh), alors que le coût de production de l'électricité, par EDF, est de l'ordre de 32 à 34 euros/MWh (0,032 à 0,034 euro/kWh). À titre de comparaison, on peut signaler que le coût de production de l'électricité est de 16,90 euros/MWh (0,0169 euro/kWh) en Suisse (grosse production hydraulique) et de 21 à 28 euros/MWh (0,021 à 0,028 euro/kWh) en Belgique.

## Principe succinct de la pile à combustible

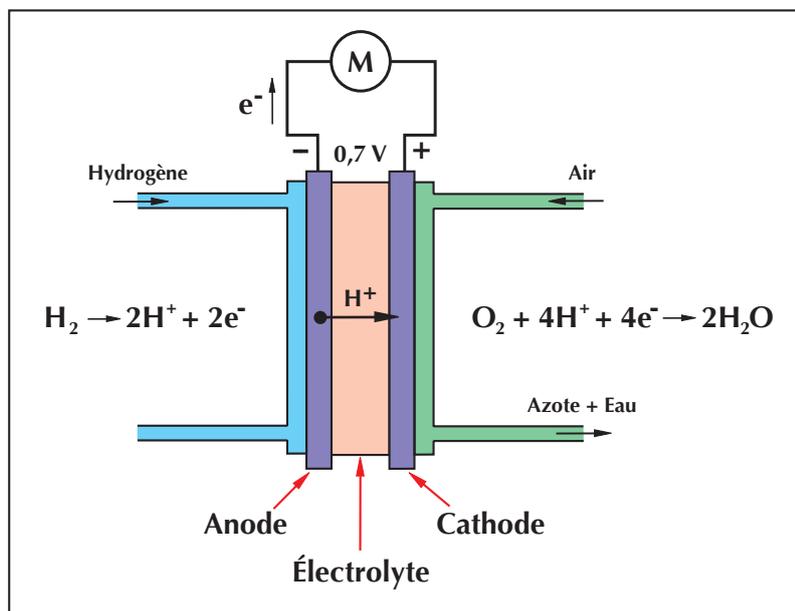
Le principe de la pile à combustible est l'inverse d'une électrolyse. La réaction chimique produite par l'oxydation et la rencontre de gaz produit de l'électricité, de l'eau et de la chaleur. Le fonctionnement de la pile à combustible nécessite un approvisionnement en combustible, le plus utilisé étant l'hydrogène.

Une pile à combustible produit une tension électrique d'environ 0,7 à 0,8 volt, selon la charge (**densité de courant**) et produit de la chaleur. Leur température de fonctionnement varie de 60 à 200 °C selon les modèles. L'eau est généralement évacuée sous forme de vapeur avec l'excédent de dioxygène.

Il existe plusieurs types de piles à combustibles dont les plus connues sont :

- la pile à membrane échangeuse de protons, qui correspond à notre autorail, et donc nous ne parlerons que de celle-ci
- la pile à oxyde solide

## La pile à membrane échangeuse de protons



Une pile à combustible à membrane échangeuse de protons comporte **deux plaques bipolaires** :

- une pour distribuer l'hydrogène,
- une autre pour distribuer l'oxygène et évacuer l'eau,

**deux électrodes** :

- une anode
- une cathode

pour faire circuler le courant électrique (électrons),

**une membrane échangeuse de protons faisant fonction d'électrolyte** :

- elle bloque le passage des électrons
- elle laisse passer les ions H<sup>+</sup>

**des catalyseurs** (platine) qui accélèrent les réactions entre les gaz.

L'hydrogène (provenant d'une électrolyse ou d'un réformage d'hydrocarbures) entre par la plaque bipolaire à gauche sur la figure. Arrivé à l'anode, le dihydrogène (H<sub>2</sub>) se dissocie (oxydation) en ions H<sup>+</sup> et en électrons selon :  $2\text{H}_2 = 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ . Les ions traversent alors la membrane, mais les électrons, bloqués, sont contraints d'emprunter un circuit extérieur, ce qui va générer un courant électrique.

À la cathode, les ions hydrogène, les électrons, et du dioxygène (pur ou provenant de l'air) se rencontrent pour former de l'eau selon la réaction :  $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ . L'eau et le dioxygène passent par la plaque bipolaire droite. Cette réaction va produire également de la chaleur pouvant être récupérée.