



LE TRANSPORT OU LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Si on produit trop d'électricité à un même instant, on ne peut pas la consommer par utilisation immédiate. Pourtant, cela arrive très souvent, par exemple quand il y a beaucoup de vent et que toutes les éoliennes fonctionnent ou dans les lieux très ensoleillés avec les installations solaires.

Que faire quand on n'utilise pas tout de suite l'électricité produite ?

On ne veut pourtant pas perdre cette électricité et on va donc vouloir la « stocker » comme on stocke du sucre pour pouvoir l'utiliser en cas de pénurie. On prend le produit disponible, on le met en réserve quelque part – sur une étagère, dans une grange – puis on le ressort pour l'utiliser quand on en a besoin.

Mais l'électricité ? ce n'est pas une marchandise que l'on peut saisir de ses mains pour la reléguer quelque part et la retrouver plus tard. On ne va pas alors « stocker l'électricité » (ce qui ne veut rien dire au sens propre) mais plutôt utiliser le trop de production pour préparer une installation qui pourra produire de l'électricité plus tard – par exemple quand les éoliennes ne fonctionneront plus faute de vent ou la nuit puisque les installations solaires ne tournent plus.



Dans d'autres cas, on veut une source d'électricité mobile (par exemple pour faire rouler les voitures). On doit là aussi préparer une installation qui pourra permettre d'utiliser l'électricité après sa production.

Trois exemples de systèmes de stockage



Remarque

Un système de stockage doit être facilement utilisable. C'est facile s'il s'agit de stocker du sucre mais pas évident pour l'électricité puis que ce n'est pas un « objet » - il faut donc prévoir dès le départ comment re-créeer de l'électricité à partir de l'installation de stockage.

Nous allons décrire trois exemples de systèmes qui marchent et qui auront de plus en plus d'importance au fur et à mesure que les nouvelles sources d'électricité (le vent, le Soleil) se développeront.

Stockage STEP (solution de transfert d'énergie par pompage)

L'électricité produite est utilisée pour faire fonctionner une pompe. Celle-ci sert à monter l'eau située dans un grand réservoir (un lac par exemple) vers un réservoir aussi grand situé à une altitude plus élevée. Pour réutiliser l'eau située dans le lac d'altitude élevée, on ouvre les vannes qui conduisent au lac inférieur : la chute d'eau fait tourner une turbine qui produit l'électricité dont on a besoin (voir chapitre sur « Le challenge de l'électricité verte »).

Stockage par production d'hydrogène

L'électricité produite en excès peut être utilisée pour produire du gaz hydrogène à partir d'eau. Ceci se fait au moyen d'un électrolyseur qui décompose l'eau en hydrogène plus oxygène. L'hydrogène (qui lui est un objet) est stocké dans des réservoirs ou dans les conteneurs qui en permettent le transport. Pour l'utiliser, on peut l'introduire comme combustible dans des brûleurs (comme on fait du gaz de ville) – c'est une solution déjà pratiquée aussi bien pour le gaz d'éclairage que pour certaines voitures ; on peut aussi l'utiliser pour alimenter des « piles à combustible » qui produisent du courant électrique à partir d'hydrogène et d'oxygène gazeux (voir plus loin).



Les piles et les batteries électriques

Les batteries sont des dispositifs (des instruments portables) qui utilisent la propriété des ions (qui sont des atomes chargés électriquement parce qu'ils présentent soit un excès soit un défaut d'électrons), de changer leur charge au cours de certaines réactions chimiques.

Dans l'état chargé, les ions positifs (charges positives par défaut d'électron) et les ions négatifs (charges négatives par excès d'électron) sont regroupés dans deux zones différentes du système ; dans l'état déchargé, ils sont également répartis (neutralité électrique). L'opération de stockage consiste à utiliser le courant pour placer la batterie dans son état chargé. L'utilisation du stockage consiste à utiliser la batterie chargée pour produire du courant jusqu'à la décharge de la batterie.

Comment marche une pile électrique ou une batterie ?

Une pile électrique, c'est une boîte (ou une cellule) qui comprend deux compartiments dans lesquels se déroulent des réactions chimiques et que l'on relie, à l'extérieur de la cellule par un fil conducteur (un fil métallique) du courant (*Fig. 1*).

Qu'est-ce qu'un ion ?

Un atome A est constitué d'un noyau (charge électrique positive) et d'électrons (charges électriques négatives) attirés autour de lui.

Si un ou des électrons manquent ou s'il y en a en trop, on dit qu'on a affaire à un ion. S'il manque des électrons, on a un ion positif A^+ . S'il y en a en trop, on a un ion négatif A^- . On note parfois l'atome A^0 l'atome neutre.

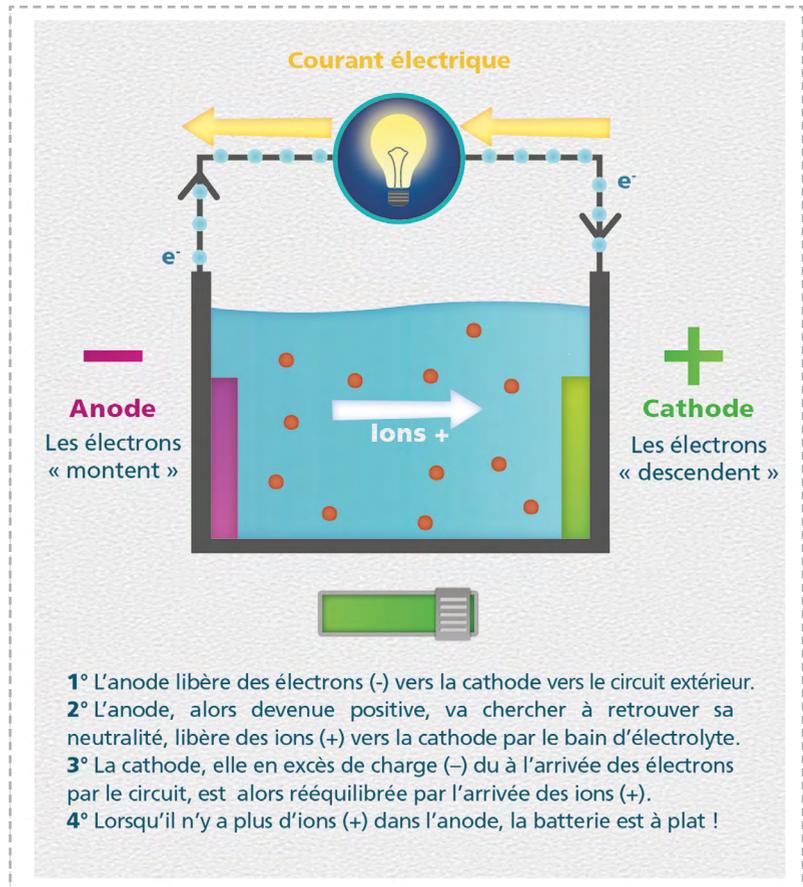


Le lithium - Li ou LiO , Li^+ (ion lithium).



Figure 1

Schéma de principe d'une pile électrique.



Dans le premier compartiment se déroule la réaction « Ion Réducteur donne Ion Oxydant + électron » qui libère un électron dans le milieu réactif. On va s'arranger pour que cet électron soit accueilli par un fil conducteur du courant électrique. Ceci se fait par l'intermédiaire d'une électrode - dans ce cas une électrode négative qu'on appelle **anode**.

Dans l'autre compartiment, la réaction chimique, au contraire, « consomme » un électron au lieu d'en libérer un. Elle se résume par « Ion Oxydant + électron donne Ion Réducteur ». L'électron - c'est l'inverse du premier compartiment - provient d'un fil conducteur du courant. Ceci se fait par l'intermédiaire d'une électrode positive qu'on appelle la **cathode**.



Les deux électrodes sont reliées par un fil conducteur du courant qui passe à l'extérieur de la boîte. L'électron, fourni à l'anode dans le premier compartiment, circule jusqu'au deuxième compartiment pour regagner la cellule et entrer en réaction chimique par la cathode. Il s'agit donc bien du passage d'un courant électrique provoqué par les deux réactions chimiques qui se passent dans la cellule.

Les réactions chimiques internes à la cellule, alimentent ainsi le circuit extérieur en électricité pour l'appareil de consommation du courant, résumé ici par une ampoule électrique – qu'on peut allumer grâce à la pile. Selon ce principe de nombreux type de dispositifs ont été construits, des piles, des batteries, des petites, des grosses, etc. selon l'usage prévu. La *figure 2* en est un exemple.

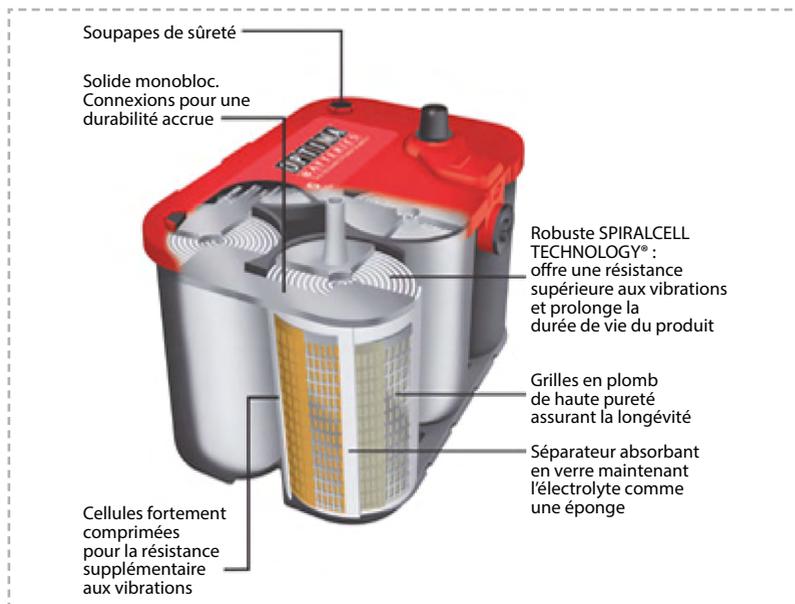


Figure 2

Schéma d'une batterie constituée de l'empilement de cellules élémentaires.



Remarque

On parle plutôt de pile lorsque le dispositif n'est pas rechargeable (jeter après usage) et de batterie lorsqu'on le recharge pour continuer à l'utiliser. L'usage courant cependant n'est pas rigoureux (on parle aussi commercialement de « pile rechargeable »).



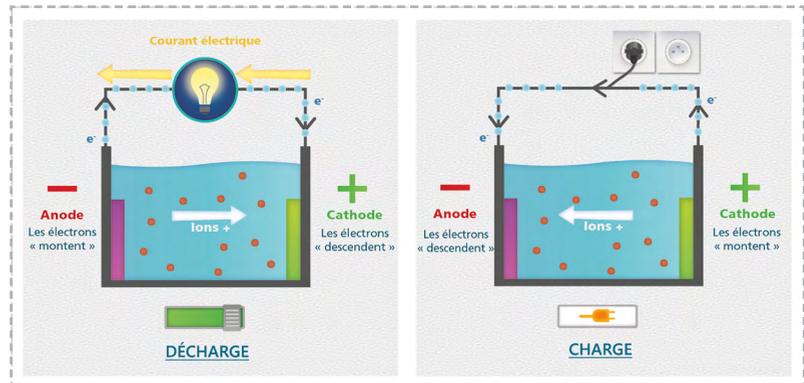
Le fonctionnement en charge et décharge d'une batterie

Au cours du fonctionnement de la pile, les électrodes s'usent. Au bout d'un certain temps, elles ne peuvent plus fournir d'électricité, la pile est vide ! Une solution simple : on jette la pile et on en rachète une neuve. C'est pratique mais ça coûte de l'argent.

Il existe d'autres solutions car certaines piles peuvent être rechargées (on les appelle alors plutôt des « batteries »). La figure 3 montre le principe.

Figure 3

Principe de charge et décharge d'une batterie.



Dans le circuit précédent, on remplace l'ampoule par un générateur de courant (par exemple, on le branche au secteur EDF). Les réactions chimiques des deux compartiments se passent alors exactement à l'inverse. Au lieu de transférer un électron de l'anode vers le circuit, on le transfère du circuit vers l'anode et symétriquement dans l'autre compartiment au lieu de transférer un électron du circuit vers la cathode, on le transfère de la cathode vers le circuit. Les mécanismes chimiques, qui avaient usé les électrodes dans la décharge, se font en sens inverse et les reconstituent (au moins partiellement) au cours de la charge. La batterie est prête à re-fonctionner.



Une batterie, c'est de la chimie ! L'exemple des batteries lithium-ion

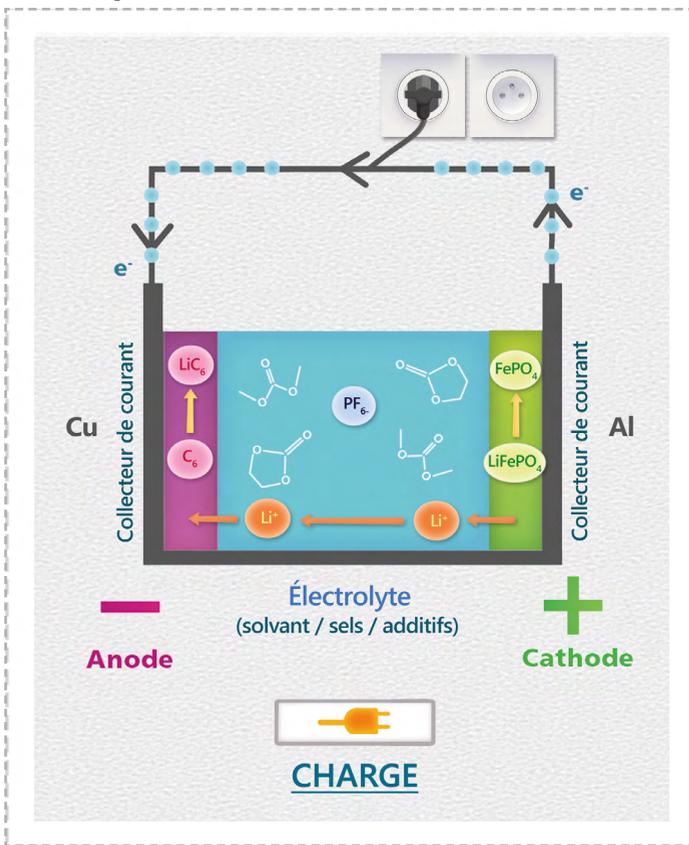


Figure 4

Schéma de la batterie lithium-ion. Réaliser une batterie selon le schéma de la figure 1 demande beaucoup de chimie : il faut définir et réaliser les matériaux des électrodes, définir la composition exacte de la solution ionique. C'est grâce à ces choix qu'on pourra obtenir de bonnes performances et des durées de vie satisfaisantes.

Le fonctionnement d'une batterie fait qu'un électron, libéré par la réaction chimique de l'anode, est accueilli par l'électrode (l'anode) pour être envoyé ensuite dans le fil conducteur. L'électron fourni à la cathode par le courant électrique est par la suite utilisé par la réaction chimique dans le compartiment cathodique (Fig. 4).



Remarque

Malgré les progrès considérables accomplis, le travail se poursuit : **pour faire marcher les voitures on doit être extrêmement exigeant (durée de vie des batteries, poids, volume et bien sûr puissance suffisante) et le tout pour un prix raisonnable.**

Ces propriétés imposent que **les matériaux choisis pour les électrodes soient les bons**. C'est un des verrous principaux dans la réalisation d'une batterie. Ils doivent avoir la bonne nature chimique de leurs atomes et la bonne structure atomique pour être retenus.

Pour la cathode d'une batterie lithium-plomb, on a développé un assemblage d'atomes de phosphore et d'oxygène (groupement phosphate), lié à des atomes de fer et des atomes de lithium en nombre égal. Ce phosphate de fer et de lithium, LiFePO_4 , peut voir sa composition en lithium varier du fait de la réaction chimique et c'est ce qui permet son fonctionnement en électrode.

Pour réaliser l'anode, on utilise préférentiellement du graphite, une forme du carbone constituée de couches empilées comme les feuilles d'un livre, et qui peut accueillir des atomes de lithium entre ses feuillets. À chaque stade des réactions chimiques qui prennent place dans la batterie, **les électrodes sont soumises à des contraintes extrêmement fortes** : échauffements locaux qui conduisent à des déformations, migrations des atomes qui entraînent des baisses de performances etc. C'est pourquoi la mise au point des électrodes est la difficulté principale de la réalisation des batteries. On a déjà de bonnes solutions, mais on explore de nouveaux systèmes qui pourraient être meilleurs.

Stockage par production d'hydrogène

Principe de la pile à hydrogène (pile à combustible)

Comme toutes les piles (*voir encart ci-dessus*), la pile à combustible comporte deux compartiments (*Fig. 5*).

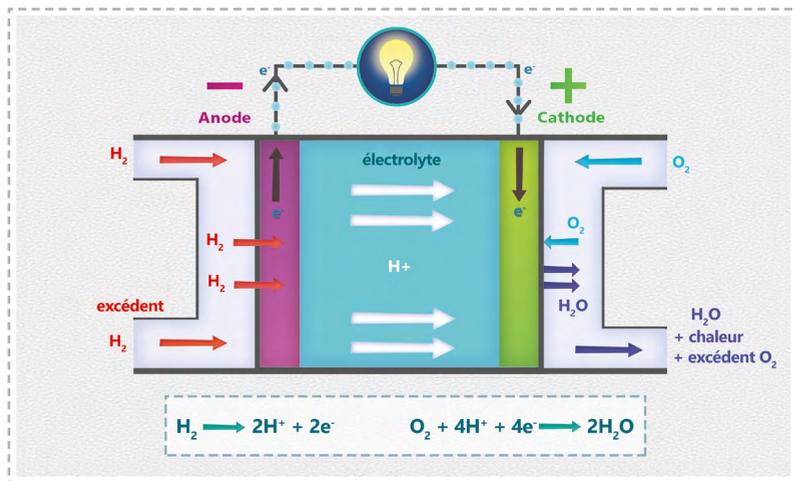


Figure 5

Schéma de principe d'une pile à combustible. Son alimentation en combustible (l'hydrogène et l'air) est particulièrement simple. Entre les compartiments anodique et cathodique, on place une membrane échangeuse d'ion dont la mise au point est difficile et encore en phase d'amélioration.

Le compartiment anodique est alimenté par un flux d'hydrogène gazeux et réalise la réaction $H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 \text{ électrons}$.

L'électron est fourni au conducteur extérieur.

Le compartiment cathodique est alimenté par un flux d'oxygène gazeux. Il s'y déroule la réaction $O_2 + 4 \text{ électrons} \rightarrow 2 \text{ ions oxygène négatifs } O^-$. Les électrons proviennent du conducteur extérieur.

Dans l'espace électrolytique qui sépare les deux électrodes à l'intérieur de la cellule, la combinaison se fait entre les ions H^+ et O^- et produit des molécules d'eau, selon la réaction $O^- + 2H^+ \rightarrow OH_2$. Dans les piles à combustible, on utilise souvent une membrane pour séparer les deux compartiments ; elle est constituée d'un polymère qui laisse passer les ions hydrogène et filtre les autres espèces.

La nature n'est pas toujours facile à manipuler ! Les trois réactions en cause, ionisation de l'hydrogène, de l'oxygène et recombinaison des ions en molécules d'eau ne se maîtrisent pas toutes seules. Par exemple l'hydrogène et l'oxygène mis en présence l'un de l'autre peuvent provoquer des accidents par explosion.

Production industrielle du gaz hydrogène

Le principe de la pile à combustible pour produire du courant est aussi celui de l'électrolyseur à eau qui fournit de l'hydrogène. C'est en quelque sorte les mêmes réactions chimiques mais dans le sens inverse.



Remarque

Pour maîtriser les réactions chimiques entre tous ces produits, on doit mettre les réactifs en présence de platine, c'est le catalyseur. La réaction fonctionne très bien, mais le procédé souffre de son prix : le platine est le métal le plus cher qui soit. Les piles à combustibles ont un fonctionnement très simple : il suffit de les alimenter par un courant d'hydrogène à l'anode et d'oxygène à la cathode ; c'est ce qui leur donne leur nom



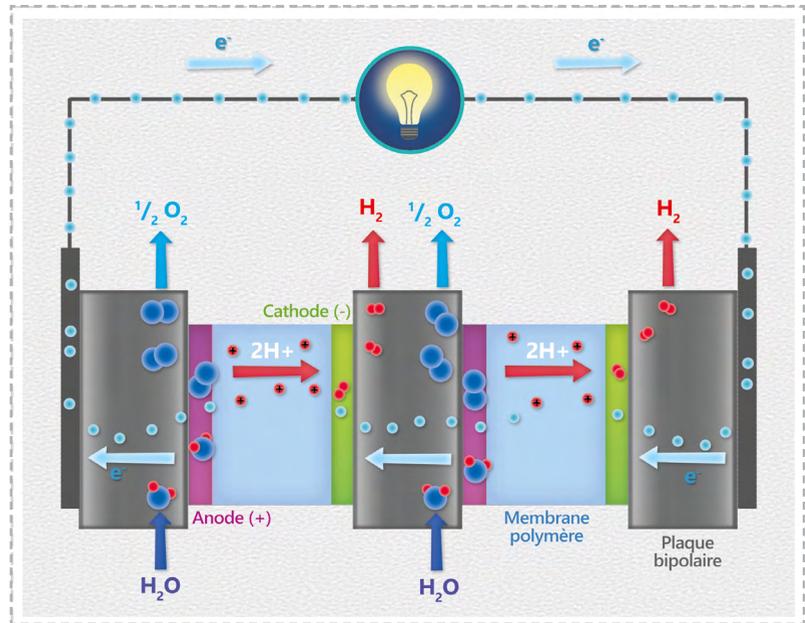
Elles ont été utilisées pour des tâches où il était difficile d'intervenir : par exemple dans la mission spatiale APPOLLO qui a vu le premier homme sur la Lune en 1969 ou encore les missions des sous-marins. Dans ces situations, il était intéressant **non seulement de tirer le courant électrique des piles à combustible, mais également l'eau produite** – car au fond de la mer, on manque d'eau potable, comme sur la Lune...lithium).

On alimente les cellules en eau et l'électrolyseur relargue de l'hydrogène à la cathode et de l'oxygène à l'anode. C'est l'« électrolyseur à eau ou à hydrogène » (Fig. 6). Les électrolyseurs peuvent être alimentés par la puissance électrique qui vient des énergies renouvelables – et le seront de plus en plus.

Des installations qui fonctionnent selon ce principe à l'échelle industrielle ont été construites à des capacités moyennes ; de plus importantes sont en construction. Elles alimentent des réserves d'hydrogène disponibles pour le transport vers les zones d'utilisation directe par combustion ou au moyen des piles à hydrogène décrites plus haut.

Figure 6

Schéma d'un électrolyseur d'eau à membrane polymère. Les électrodes (en vert sur la figure) sont séparées par une membrane « échangeuse d'ion » qui assure une simplicité et une robustesse au fonctionnement de l'électrolyseur.



Il existe d'autres procédés, purement chimiques, de production d'hydrogène. Le plus utilisé part d'un mélange de méthane (gaz naturel) et de vapeur d'eau. Grâce à l'utilisation de températures élevées (800 à 900 °C) en présence d'un catalyseur, il fournit de l'hydrogène. C'est le **procédé dit de « reformage »**. Les calories nécessaires peuvent être extraites des centrales de production d'électricité constituant ainsi une technique de stockage indirecte de l'électricité sous forme chimique.



Réseau de distribution de l'hydrogène

Un intérêt considérable de l'hydrogène est d'être transportable aisément vers tous les lieux d'utilisation. Il présente ainsi l'une des qualités du pétrole qui est éminemment transportable (sous forme d'essence ou de fuel), ce qui a permis le développement de l'automobile et plus généralement facilite considérablement la diffusion de l'énergie et de toute la technologie qui en dépend.

Sous forme de conteneurs, l'hydrogène peut être transporté vers des stations-service et permettre l'alimentation des voitures. Il existe aussi des réseaux de distribution d'hydrogène capables de fonctionner à l'échelle d'une région ou d'un pays. En France, ils sont déjà développés dans les régions de l'Est et des projets existent pour les généraliser. L'hydrogène prendra ainsi sa part pour permettre un usage « sans douleur » des énergies renouvelables malgré leur intermittence.

La voiture électrique, c'est vraiment l'avenir ?

Toutes les voitures ont failli être électriques ! Ce n'est qu'à partir des années 1920 que les voitures à essence se sont révélées moins chères et se sont imposées (voir Fig. 7).



Figure 7 La voiture électrique Chevrolet. Detroit electric car, 1912.

Autonomie 130 km, 40 km/h
 1907 : début de production (batterie au plomb ou batterie NiFe)
 Succès années 1910-1920 (plus facile à démarrer que moteurs à combustion (manivelle))
 1/3 des véhicules 1900-1920 sont électriques !
 Années 20: production diminue.
 Voitures à essence sont moins chères
 Leur autonomie est plus grande

Les batteries lithium-ion permettent une autonomie d'environ 200 km à la voiture. C'est tout à fait insuffisant par rapport aux 600 km que permet l'essence. On a aussi une grande différence dans la vitesse de recharge – le temps qu'il faut pour faire le plein - quelques minutes pour remplir son réservoir d'essence mais plusieurs heures pour recharger la batterie. L'utilisation de la batterie à la place de l'essence aujourd'hui obligerait à se limiter à des déplacements courts ou en ville – comme les bus ou les camions de livraison le font.



Figure 8



Batteries

- > 150-250 km
- > Recharge : 2 à 8 heures
- > Véhicules à usage urbains



Hydrogène

- > 500 km
- > Plein : < 50 €, 3 à 5 min
- > Toutes gammes de véhicules

On peut corriger ces inconvénients des voitures électriques **en couplant une pile à combustible à une batterie au lithium**. Elle joue alors le rôle de « **prolongateur d'autonomie** ». On peut embarquer une quantité suffisante d'hydrogène dans son véhicule pour porter l'autonomie aux valeurs habituelles aujourd'hui – 600 km. La batterie au lithium est adaptée aux démarrages et à la conduite en ville. Quand sa charge baisse, la pile à combustible se met en route ; moins performante pour une conduite discontinue, elle peut garantir une bonne autonomie. L'équipement des routes en stations à hydrogène est activement mené dans certains pays d'Europe et permettra la généralisation du système dans les dix années qui viennent.

Décrivons ainsi la voiture du futur : Elle est à traction électrique grâce à une batterie qui lui donne une centaine de km d'autonomie (une batterie au lithium), mais elle dispose aussi d'un générateur (une pile à combustible) alimenté en carburant non fossile (l'hydrogène).

Le générateur est dimensionné pour permettre une vitesse du véhicule de 130 km/h et la puissance pour permettre les accélérations habituelles. On recharge la batterie à chaque fin de trajet sur le secteur. Les petits trajets du quotidien sont parcourus uniquement avec l'énergie contenue dans la batterie. On ne recourt au générateur que pour les grands trajets. L'hydrogène est bien adapté comme carburant pour le générateur ; on peut en stocker suffisamment dans sa voiture pour une autonomie de 600 km et faire le plein en cinq minutes.

Toutes ces caractéristiques demandent à être confirmées : le prix et la fiabilité ne sont pas encore assez assurés pour permettre une généralisation de ces systèmes automobiles.



Comment sera distribuée l'électricité demain ?

Regardons déjà comment cela se passe aujourd'hui. L'électricité est produite dans de très grosses installations, les centrales électriques qui peuvent être hydrauliques, nucléaires, à fuel, à gaz, à charbon et progressivement aussi « renouvelables ». De ces centrales partent de gigantesques réseaux de transports d'électricité, installations de lignes électriques à haute tension qui alimentent toutes les communes et toutes les villes. Dans ces dernières, des « transformateurs » adaptent le courant électrique aux usagers (par exemple en tension 220 volts). De là partent les lignes « basse tension » qui amènent l'électricité à toutes les maisons.

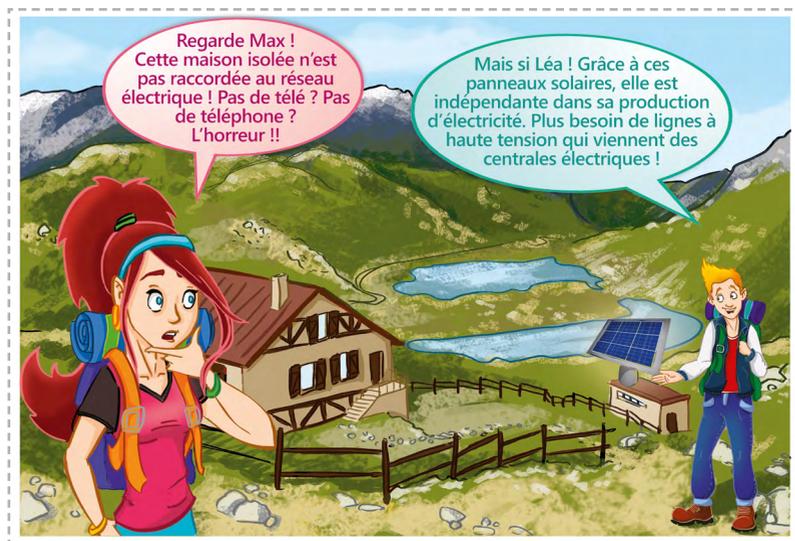


Figure 9

Même les lieux les plus isolés pourront bénéficier de l'électricité.

Dans le proche avenir, avec le développement des énergies renouvelables, les sources d'électricité (installations de production d'électricité) ne seront plus nécessairement de dimensions aussi importantes qu'à l'heure actuelle. Elles seront situées dans des endroits plus nombreux, le mieux adaptées possible aux ressources renouvelables disponibles (le vent ou le Soleil). Ainsi des sources d'électricité seront installées un peu partout. Elles pourront être très dispersées – éoliennes en petites installations, panneaux solaires



dans les villes ou les campagnes, gérées par des communes, des collectivités ou même des particuliers - même si de grosses installations industrielles (centrales électriques) – fermes solaires ou éoliennes – pourront aussi exister.

Une différence avec la situation actuelle vient de l'**intermittence des sources d'énergies renouvelables**. À côté des centrales de production d'électricité, se créera une activité industrielle « secondaire », celle des installations de stockage – STEP, usines de production d'hydrogène – qui sera adaptée au rythme de production des centrales renouvelables. Autre différence : la configuration des réseaux électriques sera très différente de ce qu'elle est aujourd'hui puisque le parc des centrales électriques sera différent.

Figure 10

Une nouvelle conception de l'énergie



D'autres installations industrielles « secondaires » seront les usines de fabrication d'hydrogène, soit par voie chimique, soit par électrolyseurs. On a vu que l'**hydrogène est un efficace moyen de stockage de l'énergie**. On utilise l'électricité quand elle est abondante pour produire le gaz, que l'on peut stocker pour l'utiliser plus tard et ailleurs pour les besoins en énergie ou en électricité.

Le **remplacement des combustibles fossiles par les énergies renouvelables** constituera une révolution dans la distribution de l'électricité dans le futur. Les transports (avions, voitures, camions) consomment environ le tiers de l'énergie totale que nous consommons. Cette



quantité considérable d'énergie sera – au moins dans sa plus grande part remplacée par l'énergie électrique. Au lieu de voir l'énergie fossile être distribuée dans les stations-service sous forme d'essence ou de fuel, on verra se multiplier sur les routes les stations de recharge de batteries ou les stations de distribution de gaz hydrogène pour utilisation directe ou pour alimentation de piles à combustible. Cette évolution bien évidemment entraînera une véritable explosion des besoins en batteries : de grosses usines de fabrications verront le jour, et prendront la place des grosses raffineries de pétrole actuelles.

Bien sûr, ce scénario pour l'électricité du futur, est simplifié. Il dépendra en particulier dans ses détails des performances que prendront les voitures électriques des décennies à venir. On peut en retenir, sans risque de se tromper que nos habitudes de vie et nos paysages vont être transformés en profondeur.

Conclusion

Les énergies renouvelables pour être exploitées demandent de nouveaux concepts technologiques et de nouvelles installations – stockage d'électricité.

Les travaux de recherche conduits en particulier depuis le début du siècle ont apporté des solutions technologiques réalistes à ces nouvelles questions. Mais elles ne sont pour autant pas définitivement résolues.

Des études très nombreuses sont toujours en cours dans les laboratoires de recherche et chez les industriels. Elles portent en particulier sur questions de chimie : chimie du solide pour déterminer des matériaux d'électrode meilleurs ou moins chers, chimie des polymères pour comprendre et améliorer le fonctionnement des membranes des cellules, physicochimie pour trouver des catalyseurs moins coûteux et pour comprendre le vieillissement des composants et essayer de le contourner.

Bref, le travail est considérable pour conserver les performances actuelles des énergies fossiles...