

POUR UNE MOBILITÉ PROPRE ET DURABLE

→ BUS À HYDROGÈNE



KEOLIS

67 000

En France, la pollution de l'air tue 67 000 personnes par an
(European Heart Journal, 2019)

7,2 milliards

En 2020, l'Etat français a partagé sa stratégie nationale pour le déploiement de l'hydrogène décarboné en France. Elle sera soutenue par un investissement de 7,2 Md€ d'ici 2030

1^{er}

Le 1^{er} bus français à hydrogène « vert » circule à Pau depuis l'automne 2019

2030

En Corée du Sud, tous les bus seront électriques en 2030 et un grand nombre d'entre eux seront alimentés à l'hydrogène
(CheckMyBus, 2018)

100%

Quand un bus à hydrogène circule, son système de propulsion est 100 % propre : il n'émet ni CO₂, ni particules fines, ni NO_x

SOMMAIRE

4 - 5

Les bus à hydrogène révolutionnent la mobilité durable

6 - 7

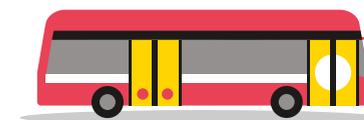
Tout ce qu'il faut savoir sur le bus à hydrogène

8 - 9

Les différents modes de production de l'hydrogène

10 - 11

Les bus à hydrogène arrivent en ville



Partenaire privilégié des territoires dans la conception et le déploiement de solutions de transport à faibles et zéro émission, Keolis accompagne les Autorités Organisatrices dans le développement de réseaux de bus à hydrogène.

Dotés de nombreux avantages, ces véhicules non polluants constituent une réponse intelligente aux défis actuels de la mobilité et séduisent les villes tout autant que les voyageurs.

LES BUS À HYDROGÈNE RÉVOLUTIONNENT LA MOBILITÉ DURABLE

Innovants et vertueux, ces bus aux performances étonnantes n'émettent ni CO₂, ni particules fines de combustion, ni NO_x et ne rejettent que de la vapeur d'eau. Des qualités essentielles dans un monde préoccupé par la santé publique, le réchauffement climatique et la dépendance aux énergies fossiles.

« Pour atteindre 32 % d'énergies renouvelables dans le mix énergétique d'ici 2030, comme s'y est engagée l'Union européenne, nous avons besoin de développer les véhicules à hydrogène. »

Valérie Bouillon-Delporte,
Présidente de l'association
Hydrogen Europe

C'EST QUOI, L'HYDROGÈNE ?

C'est l'un des éléments les plus simples de l'univers : un atome d'hydrogène est constitué d'un seul proton et d'un seul électron. C'est aussi l'un des plus abondants. Pourtant, sur Terre, l'hydrogène n'existe quasiment pas à l'état pur : il est presque toujours combiné à d'autres éléments. On peut le produire notamment par électrolyse en « cassant » une molécule d'eau (H₂O).

UN VECTEUR ÉNERGÉTIQUE PROMETTEUR

Pour l'hydrogène, on parle de « vecteur énergétique » (et non pas de « source d'énergie ») car il doit être produit puis

stocké avant d'être utilisé. En France, le ministère de la Transition écologique et solidaire considère l'hydrogène comme une des solutions clés pour développer la mobilité propre. Il encourage le déploiement des écosystèmes territoriaux de mobilité hydrogène sur la base notamment de flottes de véhicules professionnels. Dans ce cadre, l'Etat français investit plus 7 Md€ entre 2020 et 2030 dans sa stratégie de déploiement de l'hydrogène dont l'un des piliers est le développement des mobilités propres, en particulier pour les véhicules lourds. En effet ceux-ci sont particulièrement adaptés à cette énergie offrant puissance et autonomie, notamment pour les flottes captives parcourant de longues distances à flux tendus. Cette stratégie vise également à déployer des projets territoriaux d'envergure en incitant à mutualiser les usages.

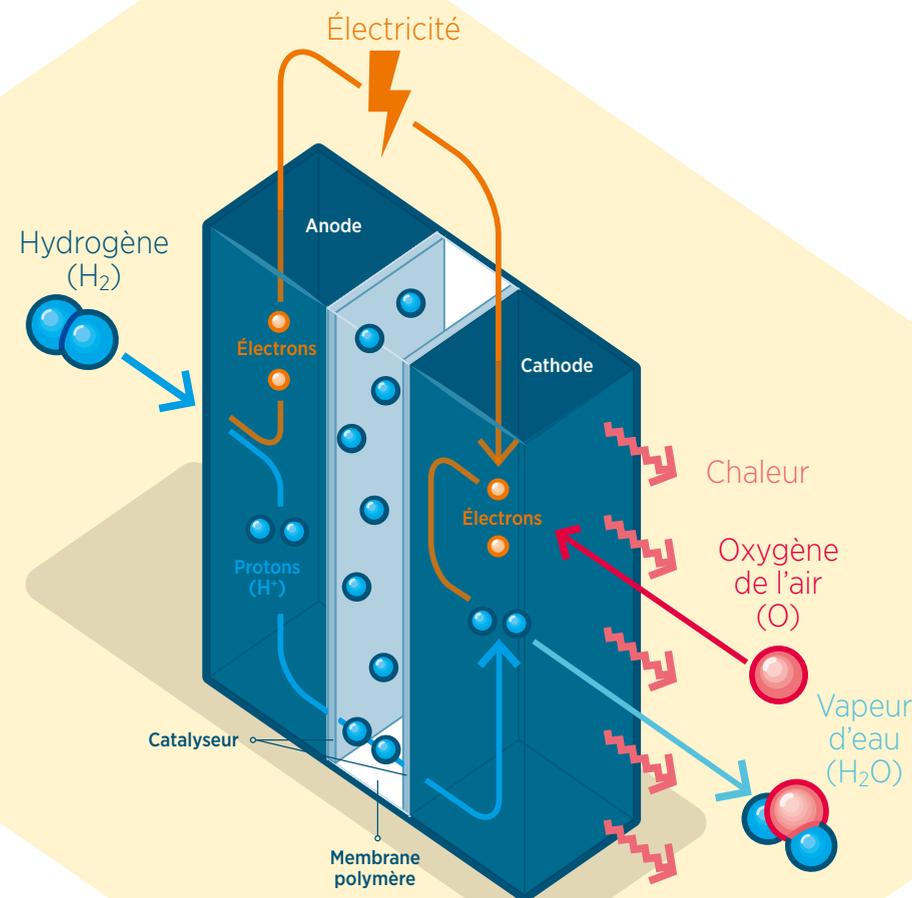
France Hydrogène – dont Keolis est membre actif depuis 2017 – rassemble les principaux acteurs de la filière (entreprises, instituts de recherche, pôles de compétitivité, collectivités territoriales...) dans le but d'accélérer le développement des solutions hydrogène.

L'Union européenne, quant à elle, soutient de nombreux projets de mobilité « hydrogène » sur le continent au travers du FCH JU⁽¹⁾. De leur côté, 60 multinationales de rang mondial unissent leurs efforts au sein de l'*Hydrogen Council* pour développer l'économie de l'hydrogène.

DES BUS PLEINS D'AVANTAGES

Pour la mobilité urbaine, le bus à hydrogène présente de nombreux avantages. Non polluant, il ne rejette ni dioxyde de carbone, ni particules, ni NO_x. Silencieux, il émet un niveau de bruit

Un bus standard de 12 m consomme en moyenne **8 kg** d'hydrogène pour 100 km



équivalent à celui d'une conversation normale. Enfin, par rapport à un bus électrique uniquement alimenté par des batteries, son temps de recharge est très réduit (10 à 30 minutes suffisent, contre plusieurs heures pour un bus électrique). Son autonomie est aussi largement augmentée (plus de 300 km, contre 200 à 250 km pour le bus électrique). Quant à l'hydrogène nécessaire à l'alimentation du bus, il peut être produit sur place, à partir d'électricité issue de sources renouvelables (voir p. 8-9).

UN CARBURANT UTILISÉ DANS D'AUTRES MODES DE TRANSPORT

Quoique rares encore en France, d'autres modes de transport peuvent également utiliser l'hydrogène. Des véhicules particuliers mais aussi des camions, des trains et des tramways peuvent aussi utiliser le gaz H₂. À Chambéry et à Laval par exemple, des vélos roulant déjà à l'hydrogène...

QU'EST-CE QU'UNE PILE À COMBUSTIBLE ?

Le combustible est l'hydrogène. La pile à combustible convertit une énergie chimique en énergie électrique : elle agit en quelque sorte comme un générateur électrique. Il en existe plusieurs types, mais la plus communément utilisée dans le secteur du transport est la pile à membrane échangeuse de protons ou PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*).

Le principe repose sur une réaction chimique simple :



Dans la pile, une réaction d'oxydoréduction se forme : cela crée de l'électricité, de la chaleur et de l'eau. Pour provoquer cette réaction, l'hydrogène est dirigé vers l'anode et se décompose au contact d'un catalyseur (généralement une fine couche de platine recouvrant les électrodes, que sont l'anode et la cathode) en protons H⁺ et en électrons e⁻. Les protons traversent la membrane et le flux d'électrons crée un courant électrique. Dans la cathode, les électrons se combinent avec les protons et l'oxygène de l'air. Cela génère de l'électricité avec un dégagement de chaleur et de vapeur d'eau.

(1) Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (engagement commun pour les piles à combustible et l'hydrogène).

TOUT CE QU'IL FAUT SAVOIR SUR LE BUS À HYDROGÈNE

Alors que les premiers bus à hydrogène circulent en Europe, offrant aux voyageurs une qualité de service optimale, toute la filière H₂ fait l'objet de normes strictes.

Les unités de production d'hydrogène, souvent des électrolyseurs, sont soumises à la nomenclature des Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) 3420. Ces unités avitaillent des stations-service qui, elles, sont sous le régime ICPE 4715. Comme pour les bus GNV ou bioGNV, la station d'avitaillement en H₂ peut être publique (ouverte à tous) ou privée (réservée à l'usage propre d'une collectivité, idéalement à proximité du dépôt de bus).

DES RÉSERVOIRS EMBARQUÉS

L'hydrogène est embarqué dans des réservoirs placés sur le toit du bus. Soumis à l'homologation

européenne EC79, ces réservoirs ont subi des tests d'éclatement, de tenue au feu ou encore de tirs à balles réelles.

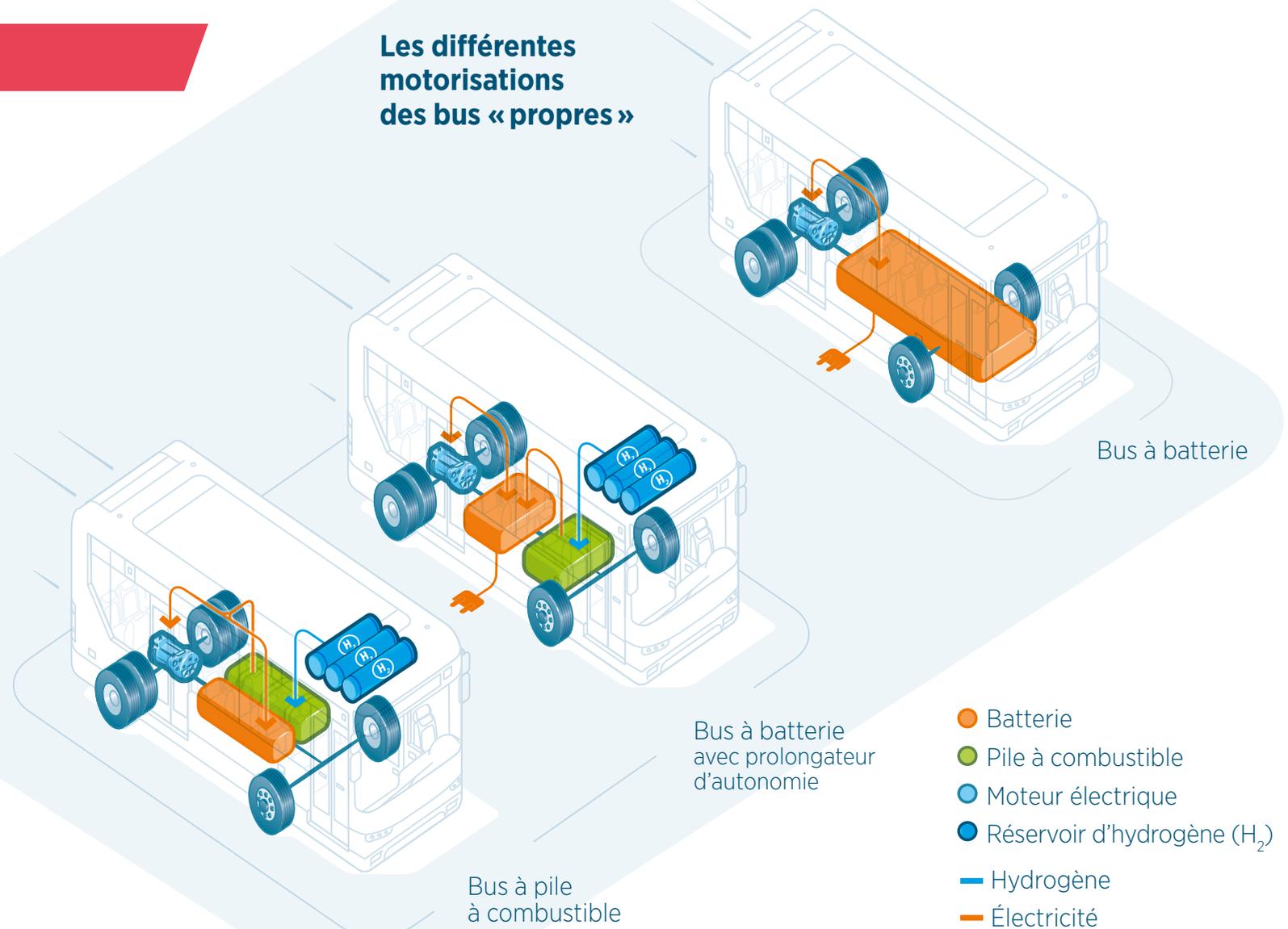
L'HYDROGÈNE FABRIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ MOTRICE

La réaction chimique qui s'opère dans la pile à combustible libère de l'électricité, ainsi que de la chaleur et de la vapeur d'eau (*voir p. 5*). Tandis que cette dernière s'évacue naturellement dans l'atmosphère, la chaleur peut être récupérée pour chauffer le bus. Une batterie dédiée permet enfin de récupérer l'énergie cinétique obtenue lors du freinage, augmentant ainsi l'autonomie du véhicule.

« Le vecteur hydrogène apporte de nouvelles solutions, complémentaires à la maîtrise des consommations d'énergie et au développement des sources renouvelables : stocker l'électricité, gérer les réseaux énergétiques, se déplacer plus proprement. »

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME)

Les différentes motorisations des bus « propres »



Bus à batterie

Bus à batterie avec prolongateur d'autonomie

Bus à pile à combustible

- Batterie
- Pile à combustible
- Moteur électrique
- Réservoir d'hydrogène (H₂)
- Hydrogène
- Électricité

UNE MAINTENANCE SPÉCIFIQUE

Les bus à hydrogène ne comportent pas de moteur thermique, ni de système de dépollution, de boîte de vitesses ou d'embrayage : leur maintenance est donc facilitée. Cependant, celle-ci requiert des compétences spécifiques. Les agents d'exploitation et de maintenance doivent donc être formés et disposer des accréditations relatives aux systèmes électriques et à l'utilisation de l'hydrogène.

LES DIFFÉRENTS MODES DE PRODUCTION DE L'HYDROGÈNE

Il y a plusieurs façons de produire de l'hydrogène. L'électrolyse de l'eau à partir d'énergie renouvelable est la solution la plus écologique. L'hydrogène ainsi obtenu est appelé hydrogène « décarboné ».

« L'hydrogène produit à partir d'énergie bas carbone sera l'un des carburants du futur pour une mobilité décarbonée. Il présente des avantages d'utilisation proches des solutions actuelles tout en ayant un bilan environnemental bénéfique. Le modèle économique de la filière hydrogène se consolidera avec l'industrialisation en grande série des composants (pile à combustible, réservoir...) et la production massive d'hydrogène décarboné. »

VAPOREFORMAGE DU GAZ NATUREL

Largement utilisé dans l'industrie, l'hydrogène peut être produit par vaporeformage du gaz naturel que l'on transforme en H₂ grâce à de la chaleur et de la vapeur d'eau. On peut aussi vaporeformer du biométhane provenant des déchets agricoles,

des déchets verts et des boues de stations d'épuration.

ÉLECTROLYSE DE L'EAU

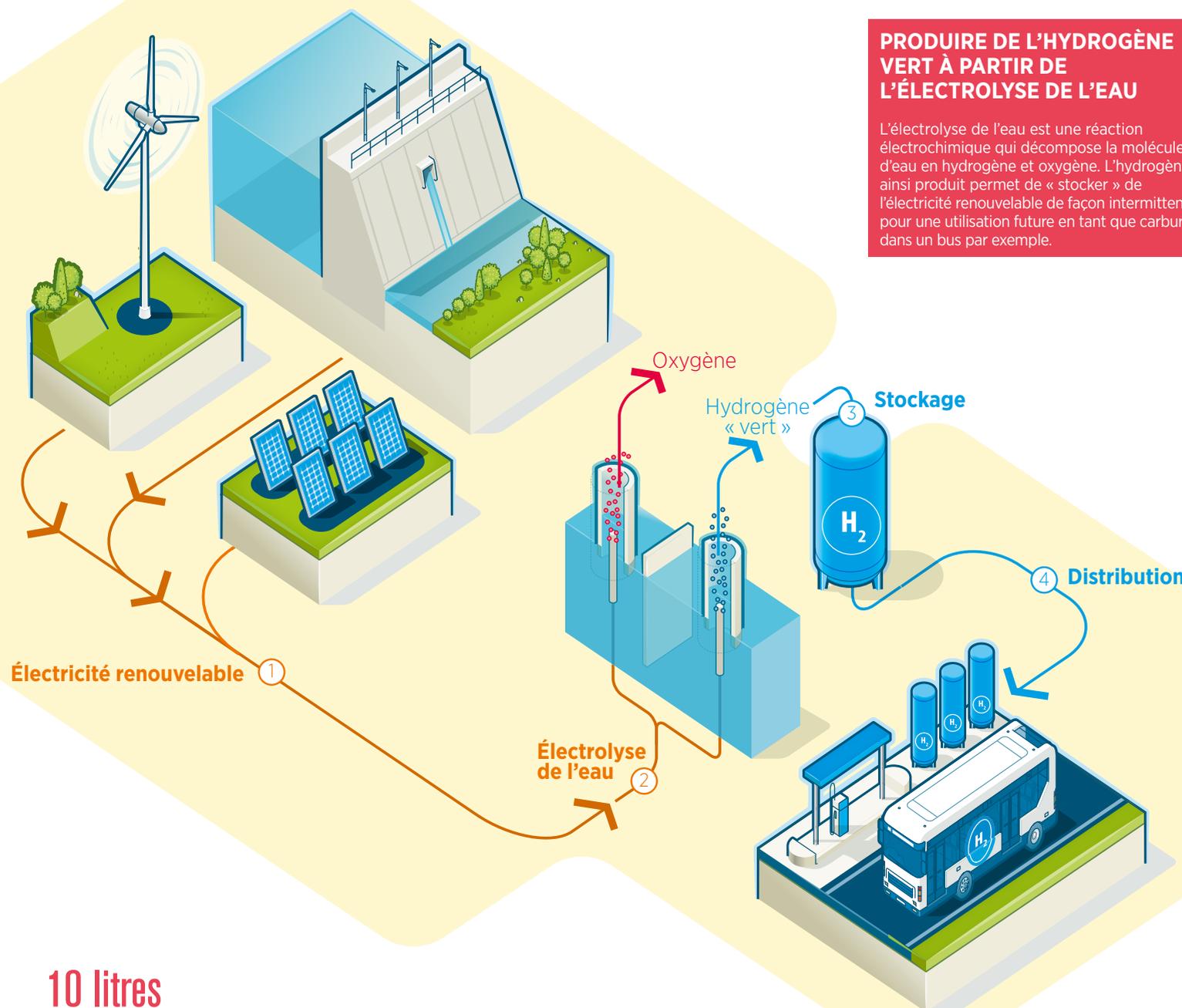
La deuxième méthode consiste à fabriquer de l'hydrogène grâce à l'électrolyse de l'eau, c'est-à-dire en faisant passer un courant électrique dans l'eau.

À la différence du vaporeformage qui émet du CO₂, cette méthode respecte davantage l'environnement. Quand l'électricité utilisée est d'origine renouvelable (éolienne ou solaire par exemple), l'hydrogène est dit « décarboné ».

10 litres
d'eau
=
1 kg
d'hydrogène

PRODUIRE DE L'HYDROGÈNE VERT À PARTIR DE L'ÉLECTROLYSE DE L'EAU

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique qui décompose la molécule d'eau en hydrogène et oxygène. L'hydrogène ainsi produit permet de « stocker » de l'électricité renouvelable de façon intermittente pour une utilisation future en tant que carburant dans un bus par exemple.



LES BUS À HYDROGÈNE ARRIVENT EN VILLE

L'hydrogène est un vecteur énergétique qui a toute sa place aux côtés du GNV (Gaz Naturel Véhicule), du bioGNV et de l'électricité. En France, Keolis accompagne Pau et Le Mans, villes pionnières de cette mobilité d'avenir, et conseille de nombreux autres territoires.

« Le moment est venu d'exploiter le potentiel de l'hydrogène qui jouera un rôle clé pour un environnement énergétique propre, sûr et sécurisé. »

Agence internationale de l'énergie (IEA)

Fin 2019, Fébus entre en service à **Pau** : huit bus à haut niveau de service, d'une longueur de 18 m, circulent du nord au sud de l'agglomération. Ils desservent 14 stations et disposent d'une autonomie de 240 km. Ces véhicules au design soigné contribuent à l'ambition écologique paloise. Rapides, propres et confortables, ils sont alimentés par de l'hydrogène produit sur place, à partir d'énergie renouvelable.

À **Versailles** et au **Mans**, un total de 6 bus à hydrogène sont en exploitation à titre expérimental depuis 2020. Là aussi, Keolis accompagne l'Autorité Organisatrice dans le déploiement de ces véhicules innovants. Tout comme à **Dijon, Lyon, Lille, Châteauroux**, où les équipes de Keolis conseillent les villes dans leurs projets d'expérimentation et de déploiement.

CONTACT

Keolis – 20 rue Le Peletier,
75320 Paris Cedex 09 – France

Tél.: +33(0)1 71 32 90 00

www.keolis.com