

Coût de la tonne de carbone évitée en remplaçant des bus diesel urbains

Comparer solutions hydrogène et batteries

Exemple de DIJON

par Frédéric Livet, SIMAP, UGA-Grenoble-Inp

L'utilisation de l'hydrogène¹ fait l'objet de fortes subventions connectées au programme de promotion de l'hydrogène. De nombreuses villes, à l'exemple de Dijon ou Pau s'appuient sur cette manne pour convertir leur flotte de bus et de camions benne du diesel ou du gaz vers l'hydrogène. Si du point de vue des émissions de CO₂, il apparaît urgent de s'affranchir des carburants fossiles, la politique consistant à s'appuyer sur l'hydrogène pour avoir une image « verte » est à mettre en face d'une politique s'appuyant sur l'utilisation directe de l'électricité et des batteries. Dans ce papier, on essaie d'estimer les émissions de CO₂ des transports urbains d'une ville comme Dijon, d'examiner le détail des mesures retenues pour remplacer les bus actuels par des bus à hydrogène et de comparer ces choix à la mise en place d'autobus électriques équipés de batteries. Cela permet de comparer les coûts de la tonne de CO₂ évitée induits par ces deux options.

1-La métropole de Dijon² aujourd'hui.

Cette métropole a en service 199 bus. Elle a une dizaine de bus électriques (Bluebus de Bolloré), 102 autobus hybrides et 83 autobus articulés. Ce sont ces 185 bus qui feront l'objet de discussion ici.

Outre ses transports, la métropole (250 communes, soit plus que « le grand Dijon ») exploite une très moderne usine d'incinération des déchets qui délivre de la chaleur sur un réseau de chauffage et de l'électricité³. La chaleur permet de générer chaque année 450 kt de vapeur à 22 bars et 220°C pour les installations de chauffage urbain. Cette forme nécessite autour de 2 700 kJ/kg de vapeur, et pour 450 kt, cela représente 338 GWh. Pour l'électricité,

¹ https://www.sauvonsleclimat.org/images/articles/images/etudes/Livet_hydrogene_2021/210419_Apercus-sur-l-hydrogene-F-Livet.pdf

² <https://www.connaissancedesenergies.org/afp/dijon-veut-faire-fonctionner-tous-ses-bus-et-camions-poubelles-avec-de-lhydrogene-vert-produit-sur-place-210519>

³ <https://www.dijon-energies.fr/sites/dijon/files/2018-12/347fbe5-5037-48882-UIOM.pdf>

initialement vendue à EDF, cela représente 55 GWh. Le prix de vente pour ce genre d'installation varie de 100 €/MWh en période d'hiver à 40 €/MWh en été. On suppose un prix de vente moyen autour de 65 €/MWh. Il faut être conscient que la production électrique vient en complément du chauffage urbain : lorsque les besoins du chauffage sont importants, cette production doit être marginale.

2-Les projets de la métropole de Dijon.

Le projet est de ne pas renouveler le contrat avec EDF et de valoriser la production électrique dans la génération d'hydrogène par électrolyse. Pour cela, un plan d'investissement sur 20 ans a été élaboré pour propulser la flotte de bus et les camions de ramassage des poubelles avec l'hydrogène. Les échéances du plan sont mal précisées, mais le projet est d'investir 100 M€ pour installer deux stations de production d'hydrogène, d'acheter 180 bus à hydrogène et 44 camions ramasse-poubelles à l'échéance 2030. Ce projet est mené avec une société du groupe Engie. La ventilation des investissements prévus est de 20 M€ pour les stations de production d'hydrogène et 80 M€ pour l'achat des véhicules. Cet investissement se fait avec une contribution de 19,5 M€ de l'ADEME, la région et l'Europe, et la métropole de Dijon espère que d'autres subventions vont couvrir jusqu'à 40 % de l'investissement. La métropole estime éviter ainsi l'émission de 4200 tonnes de GES (on imagine de CO₂) en 2026.

La première étape est la création d'une unité d'électrolyse produisant 440 kg H₂/jour, et l'achat de 27 bus et 8 camions de poubelles en 2022, sans doute après la première tranche d'électrolyseurs. À terme, avant 2030, deux installations permettraient de produire quatre fois plus d'hydrogène et d'achever la transformation complète.

L'ambition de ce papier est de discuter l'intérêt de ces choix et de comparer avec une solution basée sur des bus à batteries. En effet, il peut être néfaste que des édiles s'engagent dans une voie qui paraît plus « verte que verte » sous le simple prétexte qu'il y a des subventions à obtenir, sans une réflexion sur les fondements économiques et techniques de leur choix. En particulier, il faudra donner des estimations du prix du CO₂ évité.

3-Les caractéristiques des bus urbains.

Le fonctionnement des bus urbains est décrit dans le rapport assez complet de l'ADEME⁴. Dans l'exemple de la RATP, les bus parisiens roulent ~40 000km/an, avec une vitesse commerciale autour de 11 km/heure. Une étude des lignes de Dijon⁵ donne plutôt 15 km/heure. La puissance des moteurs est de 200 kW. Si les 185 bus de Dijon parcourent chaque année 40 000 km, cela donne sur 20 ans 800 000 km. Si on considère que l'âge

⁴ ADEME, Denis Bénita, AJBD, David Fayolle. 2018. Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains, <http://www.ademe.fr/mediatheque>

⁵ https://fr.wikipedia.org/wiki/Transports_en_commun_de_Dijon

moyen des bus en province est de 8 ans, la durée de vie globale d'un bus diesel semble être autour de 15 ans. Les calculs simplifiés de la suite supposent que tous les bus ont une durée de vie de 20 ans : la durabilité d'un moteur électrique semble meilleure qu'un diesel. Un bus consomme autour de 45 litres de gazole aux 100 km : l'ADEME donne une consommation de 40 l/100 km pour les bus hybrides et 55 l/100 km pour les bus classiques. Cela représente donc sur 20 ans une consommation de $185 \times 800\,000 \times 0.45 = 66$ Ml de diesel. Un litre de diesel émet avec les pertes de raffinage 3,1 kg de CO₂ et coûte autour de 1,3 €.

On estime donc les émissions à 210 kt de CO₂ sur 20 ans. Ces émissions de 10 kt par an sont donc beaucoup plus élevées que les 4,2 kt économisées annoncées par le projet pour 2026 (cela tient-il compte que toute la flotte de transport ne sera pas alors remplacée ?). Ces valeurs d'émissions de CO₂ seraient les mêmes avec les bus alimentés au gaz (GNV), comme montré par les études précédentes (2015) de l'ADEME⁶.

Le prix des bus au gazole est aux alentours de 250 000 €, ceux au GNV plutôt de 300 000 €. Le prix des bus électriques sera ici estimé à 300 000 €, auquel il faut ajouter la batterie. Les dernières productions de Tesla donnent des prix de 110 €/kWh. On supposera une durabilité de 7 ans (2 000 cycles)⁷, une densité d'énergie de 200 Wh/kg et 350-400 Wh/l en volume.

Il n'y a guère d'informations sur les camions poubelle, mais on peut penser qu'ils ont un bilan semblable à celui des bus, car il est annoncé qu'il leur faudra embarquer 20 kg de H₂.

4-Les coûts de la solution hydrogène

Les installations de production se proposent de monter à 4×440 kg/jour. Comme il faut 55 kWh pour produire un kilo de H₂, cela fait une consommation quotidienne de 97 MWh, soit une puissance électrique moyenne de 4 MW. Si on investit pour cette production 20 M€, cela veut dire que le prix de l'investissement est de 5 000 €/kW. C'est bien supérieur aux valeurs usuellement admises (1-2 k€/kW pour un électrolyseur), probablement à cause de la complexité de deux installations distantes, des besoins en compression de H₂... La production maximale d'hydrogène sur 20 ans est de 12 000 tonnes, et l'investissement (le « CAPEX ») représente donc 1,7 €/kg au minimum. Cette puissance serait fournie par l'usine d'incinération, et la communauté se priverait donc de la vente de l'électricité destinée à produire de l'hydrogène. Sur 20 ans, cela représente 45 M€ si on suppose un prix moyen de 65 €/MWh.

Il existe cependant un problème, lié à la probable mobilisation de la production de l'usine d'incinération pour le chauffage en hiver. La production électrique sera probablement insuffisante, largement inférieure aux 6 MW moyens fournis par la centrale, et il sera nécessaire de faire appel au réseau.

⁶ <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/autobus-urbains-2015.pdf>, p. 25

⁷ <https://www.labellebatterie.com/tout-sur-la-batterie-tesla/>

Cela peut expliquer qu'une centrale PV sur 12 ha soit prévue. On peut douter cependant qu'une centrale photovoltaïque sera d'une grande utilité en hiver, car le PV produit alors quatre fois moins qu'en été⁸. Cette centrale peut avoir une puissance crête de 7 MW (et un coût de 7 M€), mais en moyenne elle sera inférieure au MW, et en hiver sa puissance ne sera supérieure au MW que quelques heures par jour s'il fait beau. Inversement, tout cela aboutit à de forts excédents en été qu'il faudra bien écouler.

En fait, cette « usine à gaz » devra toujours faire appel au réseau pour fonctionner, ne serait-ce que pour transporter l'électricité sur les lignes publiques, ce qui est normalement facturé par ENEDIS (« TURPE ») car les ressources locales sont trop fluctuantes, que ce soit en cas de faible ou de forte production électrique. La redevance que l'on devrait ajouter ici n'est pas connue.

Pour résumer, le prix d'un kilo de H₂ comprendra 55 kWh d'électricité à 0,065 €/kWh (3,6 €) et 1,7 € de CAPEX, soit 5,3 €/kg de H₂.

Outre la production d'hydrogène, il faut tenir compte du coût des véhicules à hydrogène. Ceux-ci sont complexes, car ils doivent stocker l'hydrogène, avoir des piles à combustibles (PAC) et des moteurs électriques. Le prix estimé de tels bus est de 600 000 €. Il n'y a aucune raison qu'à échéance les moteurs électriques (200 kW) soient plus chers ou plus lourds que des diesels avec leurs boîtes de vitesse..., mais le véhicule doit se voir adjoindre une batterie, qui sert à récupérer l'énergie de freinage et à pallier les pointes de puissance des PAC. Si les bus ont un trajet quotidien de 120 km, et si on estime que l'énergie moyenne nécessaire « aux roues » est de 1,3 kWh/km, il faut, avec le rendement des PAC (autour de 50 %), près de 0,08 kg de H₂ au kilomètre. Avec une marge raisonnable, le réservoir d'hydrogène doit contenir 20 kg de H₂. Sans doute sera retenue la solution de réservoirs à 350 bars. En ce cas, un réservoir pèse ~500 kg et occupe un volume de 1 000 litres, placé sur le toit du véhicule. La PAC peut peser jusqu'à 200 kg (poids de 1 kg pour un kW). Comme un tel bus embarque une batterie destinée à pallier les limites de la PAC, on se basera sur une PAC de 150 kW. Cela rajoute une masse modeste vis-à-vis de bus qui pèsent 11 tonnes à vide et 19 tonnes au maximum. D'après l'ADEME⁹, les PAC auraient une durée de fonctionnement de 7 000 heures. Sur 20 ans, le véhicule parcourant 800 000 km à 15 km/h, il serait nécessaire de remplacer les PAC 7 fois. Le prix des PAC est estimé à 300 €/kW, ce qui donne 0,315 M€ par bus en entretien des PAC.

Si un bus couvre 800 000 km en 20 ans, il a besoin de 64 t de H₂ (0,08 kg/km) et la flotte de 180 bus consommera 11 500 tonnes de H₂. Pour 5,3 €/kg, cela fait 61 M€ (ce qui correspond à 41 M€ d'électricité et 20 M€ d'usine à hydrogène).

Le projet est d'acheter 180 bus à hydrogène, ce qui coûte 108 M€, bien plus que le budget annoncé (80 M€), surtout si on rajoute 44 bennes à ordures, dont le prix unitaire est du même ordre. On peut estimer le total à ~130 M€. Cela n'inclut pas l'entretien des bus, nécessité par la durabilité limitée des PAC. Il est fréquent que des dépassements de ce genre se produisent, et on peut deviner que l'État sera de nouveau appelé à mettre la main à la poche pour compléter l'investissement.

⁸ https://www.sauvonsleclimat.org/images/articles/pdf_files/etudes/production%20PV%20France.pdf

⁹ <https://bibliothèque.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4213-analyse-de-cycle-de-vie-relative-a-l-hydrogene.html>

De plus, la production quotidienne d'hydrogène de 1 760 kg peut s'avérer insuffisante : avec 180 bus et 44 bennes à ordures, on dispose de 8 kg par véhicule par jour, ce qui limite les déplacements moyens quotidiens à 100 km.

Le supplément d'émissions de CO₂ (l'« énergie grise ») induites par les véhicules à PAC a été estimé par l'ADEME pour des véhicules légers, il semble comparable à celui des véhicules à batterie. On supposera que ce résultat est le même ici.

5-Les coûts de la solution batteries.

Un bus électrique (350 000 €) doit embarquer une batterie qui lui donne ~200 km d'autonomie, ce qui représente 260 kWh. Une telle batterie coûte 28 k€, elle peut durer 7 ans (2 000 cycles), il faudra donc la changer deux fois. Au total, cela fait un bus à 350 000€, auquel il faut ajouter 86 000€ de batteries sur 20 ans (on néglige partout les frais d'entretien, en rappelant que l'entretien d'un diesel est plus lourd que celui d'un véhicule électrique). Le surpoids est plus important, de l'ordre de 1 300 kg, le volume de 700 litres. Il existe de très nombreuses estimations des rejets de CO₂ induits par la fabrication des batteries. Une valeur raisonnable est de 70kgCO₂/kWh¹⁰. Cela dépend beaucoup du mix électrique utilisé pour produire la batterie.

La consommation électrique bénéficie du haut rendement de cette technologie, et une valeur globale de 1,6 kWh/km (car il y a des pertes) parcouru nécessite (pour 800 000km) : $1,6 \times 0,8 \times 180 = 230$ GWh. Pour 65 €/MWh, cela fait un budget électricité de 15 M€. Le même calcul de l'électricité pour produire les 11 500 t de H₂ conduit à un budget électricité de 41 M€.

Il est nécessaire de prévoir la charge des bus, qui sera essentiellement menée pendant 8 heures la nuit. Pour fonctionner une journée (120 km, avec 1,6 kWh/km et 180 bus), il faut 35 MWh, ce qui demande une puissance électrique de 4,5 MW sur 8 heures. Le prix des bornes de recharge au dépôt est estimé à 500 €/kW, ce qui rajoute 2,5 M€ d'infrastructures au budget bus électriques. On peut être amené à prévoir un supplément de recharge rapide des bus aux terminus de certaines lignes, comme cela semble prévu par la RATP¹¹. Il est difficile de connaître les besoins sur Dijon, la puissance nécessaire à de telles bornes est de 250 kW, le prix des bornes de recharge rapide est de 1 k€/kW. Une dizaine de ces bornes rajouterait 2,5 M€ à l'installation de bus électriques.

6-Un essai de comparaison.

¹⁰ <https://www.bulletin.ch/fr/news-detail/les-batteries-au-lithium-meilleures-quon-ne-le-croit.html>

¹¹ <https://www.ratprealestate.com/projets/bus-2025/>

Le tableau essaie de rassembler les diverses estimations discutées dans le texte précédent. Comme le but est de comparer les surcoûts induits par le remplacement du gazole par l'hydrogène ou l'électrique, on ne prend pas en compte le prix des autres infrastructures, de la rémunération des personnels, toutes choses dont on supposera qu'elles ne changent pas. Les coûts sont donnés en €. Les émissions ne correspondent qu'à la propulsion.

	Bus Diesel	Bus Hydrogène	Bus électrique
Coûts Infrastructures	0 (?)	20 M€	5 M€
Coûts électricité	0	41 M€	15 M€
Coûts gazole (1,3€/l)	86 M€	0	0
Coûts achat d'un bus	0,25 M€	0,6 M€	0,35 M€
Entretien (20 ans)	?	0,35 M€	0,086 M€
Coûts bus (180)	45 M€	171 M€	65 M€
Coûts totaux	131 M€	232 M€	85 M€
Émissions totales	210 kt	10 kt	10 kt
Surcoûts	0	101 M€	-46 M€
Coûts de la tonne CO ₂ évitée		500 €	-230 €

Discussion

Ce calcul est très approximatif, on peut lui faire quelques critiques :

-Les camions benne n'y sont pas inclus. Si on veut le faire, on peut reprendre pour ces 44 camions des valeurs voisines de celles des bus et les résultats sont peu différents.

-On a estimé que la valeur de l'électricité était de 65 €/MWh. Si on fait appel au réseau, le prix de vente de l'électricité aux industriels est autour de 100 € en France (mais des abattements sont possibles dans certains cas).

-On a estimé que cette électricité n'émettait pas de CO₂. Si on fait appel au réseau, et si on admet des émissions (en France) de 55 kg CO₂/MWh, cela donne un supplément d'émissions de CO₂ de 38 kt avec H₂ et de 15 kt avec batteries. Des estimations de l'ADEME sur les usines d'incinération à Dijon donnent à peu près 100 gCO₂ pour un kWh électrique, dus à la combustion de matériaux contenant du carbone fossile, ce qui double les émissions totales estimées par rapport à celles du réseau. On peut reprendre les calculs du tableau avec ces

données, car les émissions de la « solution hydrogène » sont alors considérablement augmentées (90 kt au lieu de 10 kt !).

Ce calcul montre assez bien qu'en l'état des techniques, il semble probable que la solution électrique soit déjà moins chère que la poursuite de la propulsion diesel (valeur négative du prix du CO₂). Cela tient avant tout aux immenses progrès des batteries. Le grand problème est que la production de batteries en France et en Europe est marginale, et que le subventionnement de la filière hydrogène apparaît ici comme une fuite en avant dans une situation où les retards se sont accumulés.

Il est difficilement contestable que la solution hydrogène soit la plus coûteuse (500 €/t CO₂ évitée), et elle coûte près de 700 €/t CO₂ évitée quand on la compare à la solution batteries. Cela tient autant au progrès des batteries qu'au faible rendement global de la solution hydrogène qui nécessite près de trois fois plus d'électricité.

Pour un ingénieur, le choix de nombreux édiles de l'utilisation de l'hydrogène est surprenant. Ce choix semble fortement influencé par les subventions obtenues ou espérées : la France entend consacrer 7 G€ à cet effet. En outre, l'hydrogène « vert » a une belle image dans l'opinion, et nos élus y voient argument à réélection.

Dans le cas étudié, cela se combine avec l'idée de produire « local » et de pouvoir présenter aux électeurs un système intégré qui se passe apparemment de la contribution du réseau qui, bien que peu émetteur, est largement nucléarisé. Une telle posture est illusoire : dans un pays comme le nôtre, des régions sont productrices de grandes quantités d'électricité à cause de conditions favorables. Par exemple Auvergne-Rhône-Alpes produit 119 TWh et n'en consomme que 66 (montagnes et vallée du Rhône, avec ses barrages et ses centrales nucléaires) et des régions comme la Franche-Comté ne produisent que le quart de leur consommation. Dans une Nation, il est normal que des différences apparaissent entre les régions.

Il semble que cette volonté de produire « local » soit particulièrement paralysante pour les décisions d'investissement qui ne peuvent être prises qu'au niveau national, que ce soit l'investissement pour de nouvelles centrales nucléaires ou celui nécessaire à de futures « gigafactories » de batteries. Notre pays s'est récemment rendu compte des dégâts qu'entraîne le séparatisme dans les quartiers, mais le localisme entretenu par les élus locaux et par les idéologues « verts » est aussi destructeur pour l'unité nationale.