



Chloé Maguet
Recherche Transition énergétique

Partie 1 : Hydrogène

Quelles sont les perspectives de ce gaz pour les années à venir ?

Introduction

On parle beaucoup de l'hydrogène comme solution miracle pour la transition énergétique. Pourtant, loin d'être une énergie propre, **l'hydrogène est aujourd'hui un intrant de l'industrie chimique et pétrochimique**. Il est produit à partir de combustibles fossiles comme du gaz naturel ou du charbon pour raffiner des hydrocarbures ou produire des engrais. **Sa production entraîne l'émission de CO₂ représentant près de 9% des émissions industrielles mondiales en 2022.**

L'hydrogène possède toutefois des atouts indéniables pour la transition vers un monde décarboné : **sa combustion est propre car elle n'émet que de l'eau et une production non carbonée est envisageable**. Cet hydrogène bas-carbone ou renouvelable pourrait donner naissance à de nouveaux usages pour décarboner l'industrie, stocker de l'énergie, ou dans certains cas pour la mobilité. Mais cette technique de production étant peu efficace, elle consomme beaucoup d'électricité, entraînant des coûts deux à trois fois plus élevés que la production carbonée. Quels usages semblent alors pertinents ? Les coûts pourraient-ils baisser ?

Qu'est-ce que l'hydrogène ?



L'hydrogène est le plus petit atome de l'univers. De numéro atomique 1, il possède un seul proton et un seul électron. Sa forme stable est le dihydrogène H₂, qui est un gaz incolore et inodore à pression et température ambiante. Dans la nature, on trouve l'hydrogène principalement mélangé à d'autres atomes, comme dans le méthane CH₄ ou l'ammoniac NH₃. L'élément H est donc abondant à la surface du globe mais paradoxalement sa forme pure H₂ est rare.

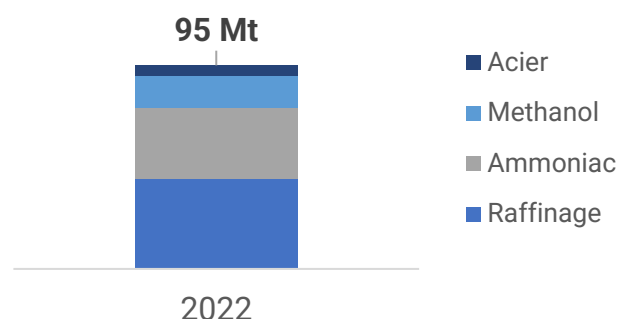
Sur le plan énergétique, le dihydrogène possède une densité énergétique massique élevée, ce qui est positif, mais sa faible densité lui confère une densité énergétique volumique faible. Il faut donc le compresser ou le liquéfier pour l'utiliser de façon optimale. Pour autant, même liquéfié, il reste 3 fois moins énergétiquement dense que l'essence pour un même volume.

Utilisation de l'hydrogène

Utilisation actuelle

L'hydrogène est utilisé aujourd'hui dans l'industrie, pour **produire de l'acier ou de l'ammoniac qui sert à produire des engrais** et pour raffiner les hydrocarbures. Il n'est pas utilisé comme une source d'énergie.

Figure 1 : Répartition de la consommation en hydrogène par usage en 2022, AIE



Nouveaux usages

Sa combustion propre fait de l'hydrogène un bon candidat pour de nouveaux usages dans un monde qui se décarbone. Il peut être utilisé pur, dans un moteur thermique ou une pile à combustible qui produit alors de l'électricité, mais aussi être transformé en carburant de synthèse pouvant alimenter des avions ou des navires.

Dans le **secteur des transports**, de nombreux usages sont envisagés, que ce soit pour le transport maritime, aérien, routier ou ferroviaire. Pour le transport aérien et maritime, l'utilisation de dihydrogène pur, ou sous forme de carburants de synthèse, semble une voie prometteuse par manque d'alternatives. En revanche, pour le transport routier et ferroviaire, l'électrification directe reste plus pertinente car plus performante, et reste donc à privilégier. En effet, si on compare l'énergie nécessaire du puits à la roue pour la voiture à hydrogène et la voiture électrique, on a pour la première des pertes de l'ordre de 77% et pour la seconde des pertes de l'ordre de 20% selon l'Ademe. L'électricité utilisée pour produire de l'hydrogène est en effet associée à des pertes importantes, puis la compression et le stockage du gaz demandent de l'énergie ; enfin, sa conversion en électricité dans la pile à combustible est associée à des pertes énergétiques sous forme thermique. Un modèle électrique, lui, ne présentera des pertes qu'au niveau de la charge et décharge de la batterie et du moteur électrique.



L'une des forces de l'hydrogène reste sa capacité à constituer un moyen de stockage de grandes quantités d'énergie sur des périodes de plus d'une semaine. Par comparaison, le stockage par batterie est surtout pertinent sur des durées de stockage de quelques heures, et le pompage d'eau, pertinent pour des stockages de l'ordre de quelques jours.

Comme **source de chaleur industrielle**, que ce soit par injection dans les réseaux actuels de gaz naturel, qui permet de limiter l'empreinte carbone de ce gaz, ou bien pur dans des chaudières à l'hydrogène, le H_2 pourrait se faire une place. Toutefois, il est concurrencé par les Small Modular Reactors (SMR), petits réacteurs nucléaires produits en série et en cours de développement.

L'hydrogène propre, plus généralement, a un rôle à jouer en **remplacement de l'hydrogène carboné**, aujourd'hui utilisé en chimie et en **remplacement des réducteurs** fossiles qui entrent en jeu dans certains procédés comme la production d'acier.

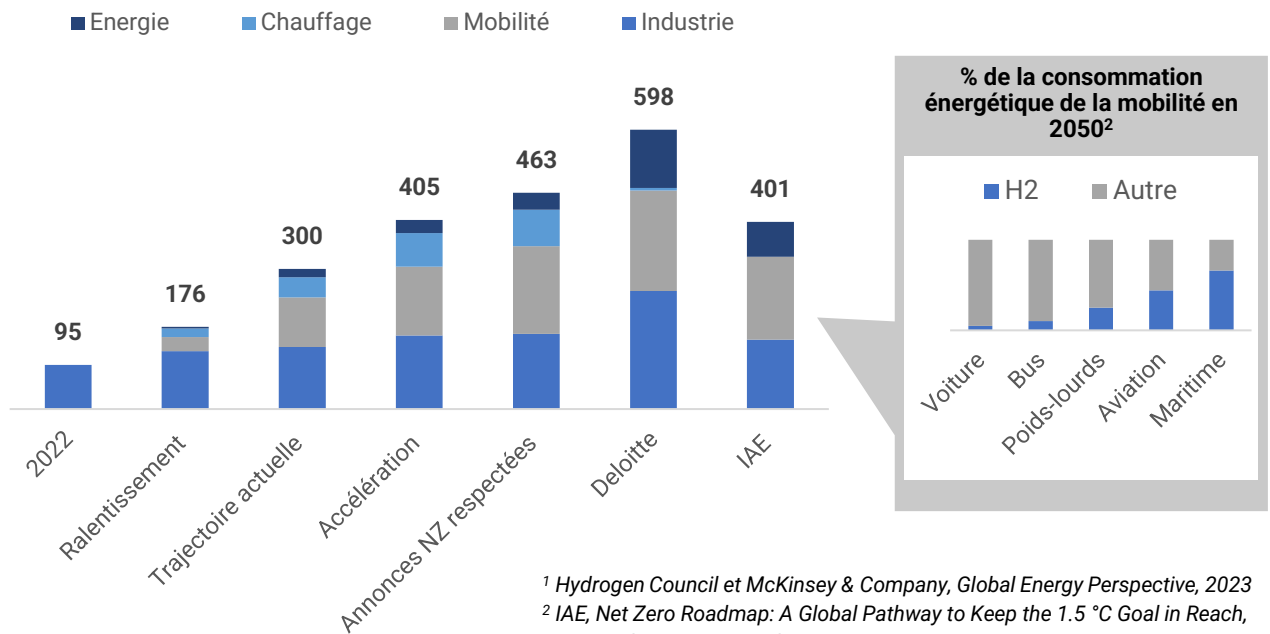
L'exemple de l'acier



Traditionnellement, l'acier est produit dans des hauts fourneaux à partir de charbon et de minerai de fer, un procédé très émetteur de CO_2 . Le charbon a un double rôle : il sert de combustible et de réducteur. Ainsi, le charbon, C, capte l'oxygène du minerai de fer, produisant du fer pur et du CO_2 . Il est aussi brûlé pour faire monter en température le four, entraînant des émissions de CO_2 supplémentaires. Une autre voie, appelée réduction directe du fer, consiste à utiliser l'hydrogène comme réducteur : la réaction produit alors de l'eau et du fer pur. Le fer peut ensuite être fondu dans un four à arc électrique. On réduit ainsi de près de 90% les émissions de CO_2 par rapport à la filière haut-fourneau.

Comment ces nouveaux usages influenceraient-ils la demande future ? Toutes les études montrent que la demande en hydrogène devrait augmenter. Attention toutefois : dans certaines études, cette future demande repose à près de 40% sur la mobilité. Or, ce marché n'existe pas aujourd'hui : tout est à construire, que ce soit en amont ou en aval. Le risque est donc grand de ne pas le voir se développer autant que prévu.

Projections relatives à la consommation de dihydrogène en 2050, par rapport à 2022 :



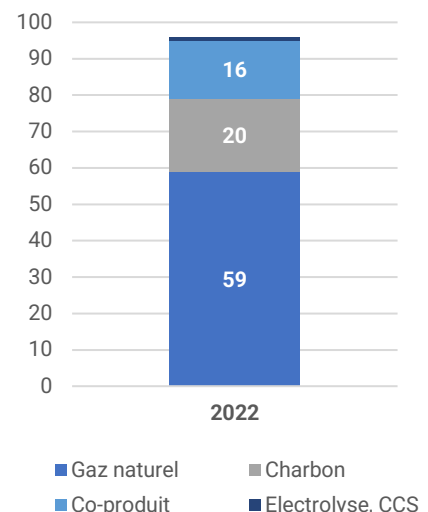
L'hydrogène décarboné aurait donc des usages plus nombreux qu'aujourd'hui, la question centrale étant : la production d'hydrogène peut-elle être suffisante et à un coût viable pour subvenir à ces besoins ?

Production, transport et stockage

Production

Aujourd'hui, la production mondiale est presque exclusivement carbonée. **En 2022, 95 Mt de dihydrogène ont été produites, dont 99% à partir de gaz naturel et de charbon, des composés fossiles.** Cette production a été fortement émettrice de gaz à effet de serre, de l'ordre de 1Gt CO₂, **soit environ 2% des émissions mondiales.** On entend souvent parler de dihydrogène vert ou renouvelable, mais celui-ci ne représente que 1% de la production.

Figure 2 : Répartition de la production de H₂ par technique (en Mt), AIE, 2022



Techniques de production carbonées

Les techniques de **production carbonées** émettent 10-20 kg CO₂/kg H₂ : malgré leur forte empreinte carbone, elles restent celles utilisées aujourd'hui.

- Le **vaporeformage** du gaz naturel consiste à chauffer à très haute température du gaz naturel en présence de vapeur d'eau. La réaction produit alors du H₂ et du CO₂.
- La **gazéification** du charbon consiste à vaporiser de l'eau sur du charbon : on produit alors, comme dans le cas du vaporeformage, du méthane, du H₂ et du CO₂.
- L'hydrogène **co-produit** correspond à une production non volontaire d'hydrogène dans l'industrie chimique ou pétrochimique. Certaines réactions chimiques produisent du dihydrogène sans que celui-ci soit le produit d'intérêt. Ce H₂ peut être récupéré et utilisé. On appelle cela de l'hydrogène co-produit.

Comment produire du dihydrogène en émettant moins de gaz à effet de serre ? La magie de la chimie nous offre une option demandant de l'eau et de l'électricité, cela s'appelle l'électrolyse de l'eau.

L'électrolyse

L'électrolyse de l'eau vise à décomposer la molécule d'eau en H₂ et O₂. Elle consiste à appliquer un courant électrique entre deux électrodes plongées dans de l'eau. À l'anode se produit l'oxydation de l'eau en O₂ et à la cathode se produit la réduction de l'eau en H₂, que l'on peut ensuite récupérer. Ce procédé demande donc de l'eau, de l'électricité et un électrolyseur



L'électrolyseur le plus simple est constitué de 2 électrodes plongées dans un récipient contenant de l'eau, mais au niveau industriel, des électrolyseurs plus complexes ont été inventés pour améliorer les rendements. Il en existe trois types : l'**électrolyseur alcalin**, le plus ancien, l'**électrolyseur à membrane échangeuse de proton (PEM)**, de plus en plus utilisé, et l'**électrolyseur à oxyde solide (SOEC)**, plus récent et moins développé.

Techniques bas carbone et renouvelables

Les techniques de production bas-carbone et renouvelables respectent les mêmes seuils d'émissions de CO₂, mais diffèrent par le type d'énergie impliqué dans le processus. Les émissions sont divisées par 10 : on obtient 1 kg d'H₂ pour 1 à 3 kg de CO₂ émis. Ces techniques sont :

- **L'électrolyse de l'eau** avec utilisation d'électricité renouvelable, comme l'éolien ou le solaire, et bas-carbone comme le nucléaire.
- Le **vaporeformage de gaz naturel avec capture carbone**, c'est-à-dire avec la mise en place d'un processus de captage du carbone dans les fumées produites pour diminuer les émissions associées à cette réaction.
- **L'extraction d'hydrogène naturel**, qui consiste à exploiter un gisement d'hydrogène comme on exploiterait un gisement de gaz naturel. La question est de trouver des gisements exploitables.

Nomenclature : les couleurs de l'hydrogène

Renouvelable



Electrolyse avec énergie renouvelable

Bas-carbone



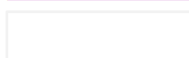
Vaporeformage du méthane et captage de CO₂



Pyrolyse du méthane



Electrolyse avec énergie nucléaire



Gisement naturel

Carboné



Gazéification du charbon



Gazéification du lignite



Vaporeformage du méthane

Transport et stockage

La faible densité de l'hydrogène fait que, pour en transporter une masse acceptable dans un volume raisonnable, il faut le compresser, voire le liquéfier. Cela demande de l'énergie et les infrastructures adéquates. Une fois liquéfié, compressé, ou transformé en un liquide riche en hydrogène (LOHC – Liquid Organic Hydrogen Carrier), il peut être transporté dans des réservoirs par bateau ou camion. Sous forme gazeuse, on peut aussi le transporter par gazoduc, comme le gaz naturel. Du fait de l'énergie nécessaire pour compresser puis transporter l'hydrogène, on envisage plutôt une production à proximité des lieux de consommation, régionalisée, plutôt qu'un marché mondialisé de l'hydrogène.

Hydrogène ou essence : ordres de grandeur

Pour 100 km avec une voiture



Essence

5 L, soit 4 kgs



Hydrogène

24 L à 700 bar, soit 1kg
(x700 par rapport
à la pression atmosphérique)

11m³ = 11 000 L
(à pression atmosphérique)

Marché et coût

L'hydrogène carboné coûte en moyenne 2,13\$/kg, tandis que l'hydrogène renouvelable coûte en moyenne 6,40\$/kg (BloombergNEF, 2023). On comprend donc pourquoi l'hydrogène propre peine à remplacer son concurrent carboné. L'hydrogène renouvelable peut-il devenir compétitif ? Quelles sont les perspectives d'évolution des coûts ?

Les coûts de production de l'hydrogène renouvelable sont répartis majoritairement entre l'électricité utilisée (50%) et les CAPEX (35%)¹. Les prix des électrolyseurs et donc les CAPEX devraient diminuer grâce à un effet d'apprentissage et d'échelle, le marché se développant. Le prix de l'électricité bas-carbone et renouvelable devrait diminuer lui aussi, mais cela dépend de nombreux facteurs indépendants de la filière hydrogène. Notons tout de même que l'hydrogène carboné est lui aussi soumis au prix de l'énergie, fossile cette fois. En effet, la majorité de son coût vient du prix du gaz naturel. Or, par exemple, en 2022, en Europe, celui-ci ayant été multiplié par 10, le prix de l'hydrogène carboné a suivi une augmentation vertigineuse, rendant l'hydrogène renouvelable compétitif. **BloombergNEF prévoit que l'hydrogène renouvelable devienne compétitif dans près de 90% des marchés d'ici 2035.**

Limites actuelles et leviers de développements

Les débouchés de l'hydrogène restent encore incertains, laissant planer un doute quant au développement de la filière. Pour certains usages, des alternatives semblent plus pertinentes comme l'électrification, ou les pompes à chaleur pour le chauffage. Si pour l'aviation et le transport maritime, les carburants de synthèse à base d'hydrogène semblent être la seule option pour décarboner le secteur, pour les voitures particulières, les véhicules électriques sont plus performants. L'hydrogène ne semble donc pas être une solution dans tous les domaines.

De plus, les coûts associés à la production par électrolyse sont encore élevés, notamment à cause du prix des électrolyseurs qui baisse moins vite que prévu, mais aussi en raison de la forte dépendance au prix de l'électricité bas-carbone ou renouvelable. L'électrolyse demande des quantités très importantes d'électricité, dont la disponibilité pose question dans un monde qui électrifie de nombreux usages en parallèle. **On notera par exemple que pour remplir son objectif de production d'hydrogène par électrolyse, la France aurait besoin de quatre nouveaux réacteurs nucléaires EPR2 semblables à ceux de Flamanville.**

Les coûts restent élevés en raison du **faible rendement des électrolyseurs**, mais aussi de la pile à combustible ou des réactions de synthèse à partir de l'hydrogène.

Enfin, la production d'hydrogène n'échappe pas au risque de rupture d'approvisionnement en métaux, risque commun aux différentes technologies de la transition énergétique. En effet, la production d'électrolyseur et de pile à combustible demande du nickel, du platine, de l'aluminium et des terres rares. Ces métaux ont vu leur demande augmenter, et les prévisions annoncent une demande supérieure à l'offre d'ici 2050. De plus, la concentration de l'extraction dans un petit nombre de pays augmente le risque de disruption de la chaîne d'approvisionnement. Par exemple, plus de 70% du platine est extrait en Afrique du Sud. En ce qui concerne le raffinage, le marché est encore plus concentré, largement dominé par la Chine pour tous les minerais. Pour les terres rares par exemple, la Chine représente plus de 80% du raffinage.

Leviers

L'innovation permettrait, d'une part, d'augmenter l'efficacité des processus et de diminuer les coûts et, d'autre part, de proposer des nouveaux cas d'usage, ce qui aurait pour conséquence d'augmenter la consommation finale en hydrogène.

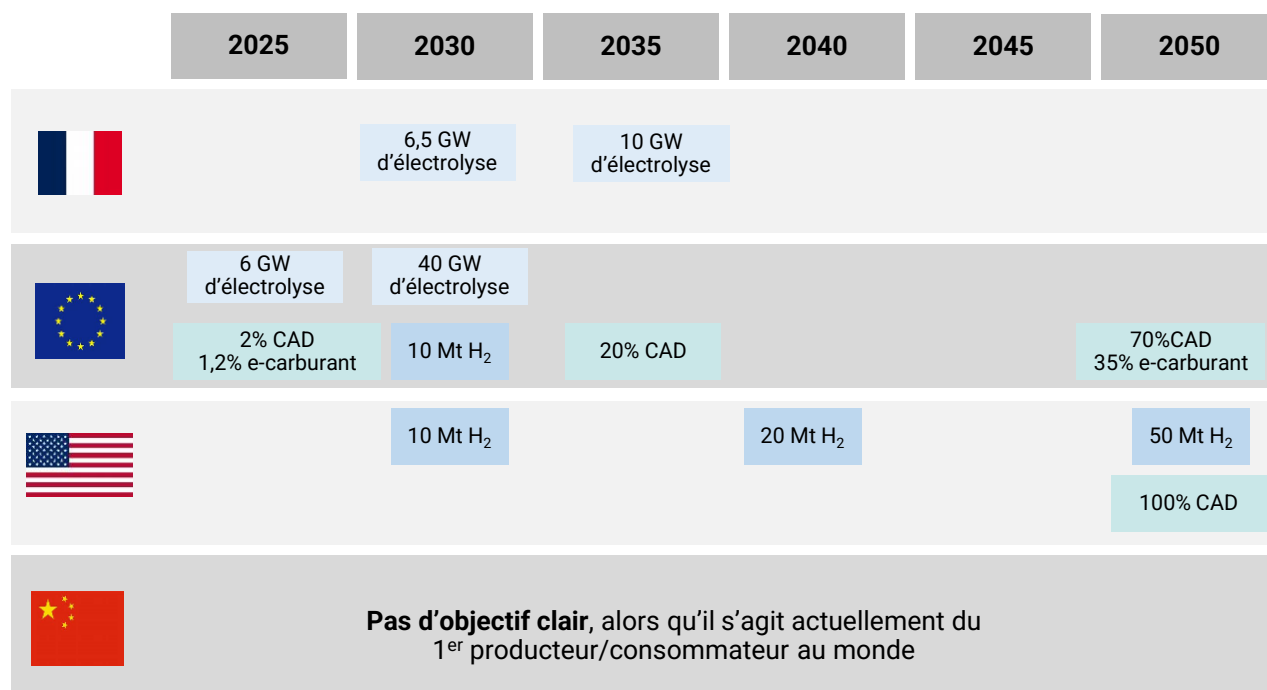
À l'international, on voit des progrès sur les électrolyseurs : une entreprise australienne, Hysata, a annoncé un électrolyseur avec un rendement de près de 95%, bien supérieur à la moyenne actuelle de 70%. Si la technologie s'avère viable, et si la promesse de rendement est tenue, cela pourrait modifier les perspectives de développement de la filière hydrogène.

La réglementation joue un rôle important pour cadrer et donner une ligne directrice visant à rassurer les investisseurs et donc stimuler les investissements. Trois points restent à clarifier : les seuils d'émission permettant de déclarer l'hydrogène comme renouvelable ou bas-carbone, la méthodologie à utiliser pour calculer ces émissions, notamment en cas d'utilisation d'électricité venant du réseau électrique, et enfin des normes de sécurité sur l'utilisation d'hydrogène.

En ce qui concerne les seuils d'émission, des réglementations ont été définies au niveau local. Par exemple, la France a défini un seuil de 3,38 kg CO₂/kg H₂, quand la Chine définit son hydrogène bas carbone avec un seuil de 14,51 kg CO₂/kg H₂ et renouvelable avec un seuil de 4,9 kg CO₂/kg H₂, peut-on lire dans son document « Standard and Evaluation of Low-carbon Hydrogen, Clean Hydrogen, and Renewable Hydrogen » datant de 2020. On comprend donc l'urgence d'avoir une réglementation homogène, au risque de voir les producteurs européens découragés par la réglementation plus stricte en Europe.

Les **investissements** devraient être une résultante du développement de l'innovation et d'une réglementation plus claire et favorable. On notera que les investissements publics jouent un rôle important, permettant de déclencher des investissements privés. En ce sens, de nombreuses stratégies liées à l'hydrogène ont été mises en place avec une tendance à l'accélération ces dernières années. Un exemple récent : aux Etats-Unis, l'IRA (Inflation Reduction Act) prévoit des subventions sous la forme d'un crédit d'impôt entre 0,6\$ et 3\$ par kilogramme de H₂ produit, en fonction des émissions associées.

Les objectifs mondiaux sont ambitieux, mais seront-ils atteints ? Rendez-vous en 2030, potentielle année d'inflexion de ce marché, tant au niveau de l'offre que de la demande. Si l'on regarde la stratégie européenne, l'objectif de 6 GW d'électrolyseurs en fonctionnement en 2025 ne devrait pas être atteint. Reste à savoir si ce retard pourra être rattrapé d'ici 2030.



Conclusion

Avant de penser à l'hydrogène comme une source d'énergie qui remplacerait les combustibles fossiles, la première étape serait plutôt de décarboner la production fortement émettrice dans le domaine industriel. Dans un second temps, l'hydrogène produit avec de faibles émissions serait un moyen de décarboner certaines activités, comme la sidérurgie, en remplacement du charbon ou du gaz naturel comme réducteur. **Enfin, il serait un outil de décarbonation prometteur pour certains moyens de transport, notamment aérien et maritime, pour lesquels l'électrification n'est pas envisageable.**

Article rédigé en date du 12 juillet 2024. Communication publicitaire. Ce document n'a pas de valeur précontractuelle ou contractuelle. Il est remis à son destinataire à titre d'information. Les analyses et/ou descriptions contenues dans ce document ne sauraient être interprétées comme des conseils ou recommandations de la part de Lazard Frères Gestion SAS. Ce document ne constitue ni une recommandation d'achat ou de vente, ni une incitation à l'investissement. Ce document est la propriété intellectuelle de Lazard Frères Gestion – S.A.S au capital de 14.487.500€ – 352 213 599 RCS Paris 25, RUE DE COURCELLES – 75008 PARIS. Numéro d'agrément AMF : GP-04000068.

A propos du groupe Lazard :

Fondée en 1848, **Lazard** est l'une des principales sociétés de conseil financier et de gestion d'actifs au monde, avec des activités en Amérique du Nord et du Sud, en Europe, au Moyen-Orient, en Asie et en Australie. Lazard offre ses conseils en matière de fusions et acquisitions, marchés de capitaux, restructuration/gestion du passif, géopolitique et autres questions stratégiques, ainsi que des solutions de gestion d'actifs et d'investissement aux institutions, aux entreprises, aux gouvernements, aux partenariats, aux family offices et aux particuliers fortunés. Pour plus d'informations, veuillez consulter le site www.lazard.com.

Lazard Frères Gestion est la société de gestion d'actifs du groupe Lazard en France, spécialisée dans l'investissement dans les valeurs cotées. Elle bénéficie, pour accompagner ses clients, de tous les savoir-faire d'une grande maison de gestion adossée à un puissant groupe international. Pour plus d'informations sur Lazard Frères Gestion : www.lazardfreresgestion.fr.



Website

lazardfreresgestion.fr



Blog

latribune.lazardfreresgestion.fr



LinkedIn

[Lazard Frères Gestion](https://www.linkedin.com/company/Lazard-Freres-Gestion)



X

[@LazardGestion](https://twitter.com/LazardGestion)



Youtube

[Lazard Frères Gestion](https://www.youtube.com/LazardFreresGestion)