

ASSEMBLÉE NATIONALE

17^e LÉGISLATURE

Compte rendu

Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

- **Examen** du rapport d'évaluation de la décarbonation du secteur des transports terrestres, en application de l'article 73 de la loi d'orientation des mobilités (LOM) du 24 décembre 2019 (Jean-Luc Fugit, député, et Pierre Médevielle, sénateur, rapporteurs).....2
- **Examen** de la note scientifique sur l'hydrogène natif (Gérard Leseul, député, et Michaël Weber, sénateur, rapporteurs)..... 10
- **Examen** du rapport de conclusions de l'audition publique sur « Hantavirus, zoonoses, science et société : quelles leçons pour l'avenir ? » (Pierre Henriet, député, et Stéphane Piednoir, sénateur, rapporteurs).....19

Jeudi 2 juillet 2026

Séance de 9 heures

Compte rendu n° 230

SESSION ORDINAIRE DE 2025-2026

**Présidence
de M. Stéphane
Piednoir,
*président***



Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

Jeudi 2 juillet 2026

– Présidence de M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office –

La réunion est ouverte à 9 h 00.

Examen du rapport d'évaluation de la décarbonation du secteur des transports terrestres, en application de l'article 73 de la loi d'orientation des mobilités (LOM) du 24 décembre 2019 (Jean-Luc Fugit, député, et Pierre Médevielle, sénateur, rapporteurs)

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office. – Nous abordons le deuxième sujet à l'ordre du jour ce matin : l'examen du rapport d'évaluation de la décarbonation des transports terrestres, en application de l'article 73 de la loi d'orientation des mobilités de 2019, qui va nous être présenté par nos collègues Jean-Luc Fugit et Pierre Médevielle.

M. Jean-Luc Fugit, député, vice-président de l'Office, corapporteur. – Pierre Médevielle et moi-même sommes très heureux de vous présenter aujourd'hui les conclusions de nos travaux consacrés à l'évaluation de la décarbonation des transports terrestres.

Ce rapport répond à une mission particulière confiée à l'Office par le législateur lui-même. En effet, l'article 73 de la loi d'orientation des mobilités de 2019 prévoit que l'Office établit, tous les cinq ans, un rapport d'évaluation de la mise en œuvre des objectifs de décarbonation des transports terrestres. Ce rapport donne ensuite lieu à un débat devant chacune des deux assemblées. Il s'agit donc d'une mission d'évaluation inscrite dans la loi, qui nous confère une responsabilité particulière.

Pour conduire cette évaluation, nous avons suivi la méthode habituelle de l'Office. Nous avons entendu un très large éventail d'acteurs : administrations, organismes de recherche, industriels, énergéticiens, constructeurs automobiles, représentants des collectivités territoriales, opérateurs de transport, fédérations professionnelles et associations.

Compte tenu de l'agenda chargé de la réunion d'aujourd'hui, nous avons choisi de mettre l'accent sur les principaux enseignements de nos travaux et sur quelques grandes orientations.

M. Pierre Médevielle, sénateur, corapporteur. – Je remercie Jean-Luc Fugit pour cette introduction. Je vais commencer par présenter quelques constats.

Notre premier constat est bien connu, mais mérite d'être rappelé tant il explique l'ensemble de la politique conduite aujourd'hui. Les transports constituent désormais le premier secteur émetteur de gaz à effet de serre, tant en France qu'à l'échelle de l'Union européenne. Alors que la plupart des autres secteurs économiques ont engagé, depuis les années 1990, une réduction progressive de leurs émissions, celles des transports sont longtemps demeurées relativement stables.

En France, les transports représentent aujourd'hui près d'un tiers des émissions nationales de gaz à effet de serre. Mais d'autres taux sont tout aussi importants. Lorsque l'on examine plus précisément l'origine de ces émissions, on observe qu'environ 95 % d'entre elles proviennent des transports terrestres et que plus de 94 % sont imputables au seul transport routier.

Autrement dit, si nous voulons atteindre nos objectifs climatiques, c'est bien sur le transport routier que doivent porter prioritairement les efforts. C'est pourquoi nous avons choisi de concentrer l'essentiel de nos travaux sur les véhicules routiers – voitures particulières, véhicules utilitaires, poids lourds, bus et autocars – ainsi que sur les mobilités actives.

Notre deuxième constat concerne le cadre dans lequel s'inscrit cette transition. La décarbonation des transports n'est plus seulement une ambition politique ; elle repose désormais sur un ensemble cohérent d'objectifs européens et nationaux particulièrement structurés.

Au niveau européen, le Pacte vert, la loi européenne sur le climat, le paquet « Fit for 55 », le règlement sur les émissions de CO₂ des véhicules ou encore le règlement relatif aux infrastructures pour carburants alternatifs dessinent une trajectoire extrêmement ambitieuse. La France a progressivement décliné cette stratégie, au travers de la loi d'orientation des mobilités, à l'origine de nos travaux, de la loi Climat et résilience, de la Stratégie nationale bas-carbone et de nombreux dispositifs de soutien à l'électrification des usages.

Si nous avons été frappés, au cours de nos auditions, par la cohérence de cet ensemble, de nombreux acteurs ont souligné que la multiplication des dispositifs et leur évolution fréquente pouvaient nuire à leur lisibilité et à leur stabilité.

Notre troisième constat est sans doute celui qui relève le plus directement de la vocation de l'Office. La décarbonation des transports est avant tout une question scientifique et technologique. Elle ne peut être réduite à une opposition entre quelques technologies concurrentes. Les auditions nous ont montré que les progrès sont aujourd'hui rapides dans de nombreux domaines : batteries, hydrogène bas-carbone, biocarburants avancés, biométhane, carburants de synthèse, retrofit ou encore infrastructures de recharge. Cette diversité constitue une richesse. Elle traduit également le fait que les besoins des différents segments de transport sont extrêmement variés.

Une solution pertinente pour un véhicule particulier urbain ne l'est pas nécessairement pour un poids lourd parcourant plusieurs centaines de kilomètres par jour, ni pour un autocar longue distance, ni pour un engin spécialisé. C'est pourquoi nous avons souhaité éviter toute approche fondée sur une opposition entre technologies. Nous considérons au contraire que les politiques publiques doivent s'appuyer sur une évaluation scientifique objective des performances de chacune d'entre elles.

À cet égard, un point a fait l'objet d'un consensus très large au cours des auditions, même s'il n'a pas été total. Il concerne l'analyse du cycle de vie. Cette méthode consiste à évaluer l'ensemble des émissions associées à un véhicule, depuis l'extraction des matières premières nécessaires à sa fabrication jusqu'à son recyclage, en passant par la production de l'énergie utilisée et son utilisation pendant toute sa durée de vie.

Elle permet d'aller bien au-delà des seules émissions à l'échappement qui fondent aujourd'hui une grande partie des réglementations européennes. Nous considérons que cette approche constitue désormais le cadre méthodologique de référence pour apprécier les performances environnementales des différentes technologies.

Bien entendu, elle ne saurait être le seul critère de la décision publique. Les choix technologiques doivent également prendre en compte d'autres considérations, notamment la souveraineté énergétique, la compétitivité industrielle, la disponibilité des matières premières critiques, la résilience des chaînes d'approvisionnement ou encore les contraintes économiques pesant sur les ménages et les entreprises.

Je vais redonner la parole à Jean-Luc Fugit qui va notamment aborder la question des véhicules légers.

M. Jean-Luc Fugit, député, vice-président de l'Office, corapporteur. – J'en viens aux principaux enseignements de notre rapport.

Contrairement à ce que l'on entend parfois, il n'existe pas une seule transition des transports, mais plusieurs transitions. La décarbonation progresse aujourd'hui à des rythmes très différents selon les catégories de véhicules.

Les véhicules légers constituent incontestablement le segment le plus avancé. Ainsi, la part des voitures électriques particulières dans les immatriculations neuves a fortement progressé en quelques années, de 6,4 % en 2020 à près de 20 % en 2025, portée par les normes européennes, l'élargissement de l'offre industrielle et les différents dispositifs publics de soutien.

Cette dynamique est encourageante. Elle ne doit toutefois pas masquer plusieurs réelles difficultés. La première demeure le coût d'acquisition des véhicules. La deuxième concerne le développement encore insuffisant du marché de l'occasion, qui sera pourtant indispensable pour démocratiser l'accès à ces véhicules. La troisième porte sur les infrastructures de recharge, même si notre pays dispose désormais de l'un des réseaux publics les plus développés d'Europe.

Enfin, un dernier point mérite d'être souligné. L'ensemble des acteurs entendus nous ont rappelé que la réussite de cette transition ne dépendra pas uniquement des technologies. Elle dépendra tout autant de son acceptabilité économique et sociale. Les investissements nécessaires sont considérables, qu'il s'agisse du renouvellement des véhicules, du développement des infrastructures ou de l'adaptation des réseaux énergétiques.

Or, l'efficacité des dispositifs de soutien dépend non seulement de leur niveau, mais également de leur stabilité dans le temps. Les évolutions fréquentes de ces dispositifs, qu'il s'agisse de leur montant, de leurs conditions d'éligibilité ou de leur calendrier, sont susceptibles de créer une incertitude préjudiciable aux décisions des ménages comme à celles des acteurs économiques.

Pierre Médevielle va maintenant vous présenter les principaux enseignements de nos travaux concernant les poids lourds, les transports collectifs et les mobilités douces.

M. Pierre Médevielle, sénateur, corapporteur. – Je vais donc aborder le transport routier de marchandises. Il s’agit probablement du segment le plus complexe à décarboner.

Les poids lourds représentent près d’un quart des émissions du transport routier, alors même qu’ils sont indispensables au fonctionnement de notre économie.

Les auditions que nous avons conduites montrent que cette transition présente des difficultés très différentes de celles rencontrées pour les véhicules légers. Les contraintes d’autonomie sont beaucoup plus importantes. Le poids des batteries réduit la charge utile transportée. Les temps de recharge doivent rester compatibles avec les impératifs logistiques. Les infrastructures sont encore largement insuffisantes. Enfin, les investissements sont considérables pour un secteur composé en majorité de petites et moyennes entreprises, dont les marges sont souvent très faibles.

Dans ces conditions, nous pensons que la transition du transport routier de marchandises devra être progressive et accompagnée. Elle s’appuiera naturellement en priorité sur l’électrification, à chaque fois que celle-ci est pertinente.

Mais les auditions nous ont également convaincus qu’aucune technologie ne permettra, à elle seule, de répondre à l’ensemble des besoins. Nous avons entendu des représentants de la filière électrique, de la filière hydrogène, de la filière biométhane, des producteurs de biocarburants, des constructeurs, des transporteurs et des énergéticiens. Tous ont, bien entendu, mis en avant leurs propres solutions.

Pour autant, un constat commun s’est progressivement dégagé. Les usages sont trop divers pour qu’une réponse unique puisse être apportée à ce stade. Nous considérons donc qu’il convient de préserver une approche fondée sur la complémentarité des solutions énergétiques bas-carbone.

Cette complémentarité devra évidemment évoluer avec les progrès technologiques, la baisse des coûts des technologies d’électrification, la disponibilité des infrastructures de recharge et les retours d’expérience. Mais elle nous paraît aujourd’hui constituer la démarche la plus réaliste.

Je souhaite maintenant dire quelques mots des transports collectifs et des mobilités actives, qui constituent un autre levier important de la décarbonation.

Les auditions ont montré que les bus et les autocars figurent parmi les segments les plus avancés de la transition énergétique. L’électrification des bus urbains progresse rapidement, portée par le renouvellement des flottes des autorités organisatrices de la mobilité et par une offre industrielle désormais bien établie. Les autocars demeurent confrontés à davantage de contraintes, notamment pour les longues distances, mais plusieurs solutions technologiques sont aujourd’hui en cours de développement.

Au-delà des motorisations, les transports collectifs jouent un rôle essentiel en favorisant le report modal de la voiture individuelle vers des modes de déplacement plus sobres en carbone. Leur développement est donc un complément indispensable à l’électrification du parc automobile.

Nos travaux ont également confirmé le potentiel des mobilités actives, en particulier du vélo, pour les déplacements quotidiens de courte distance. Leur contribution à la décarbonation dépend toutefois de la poursuite des investissements dans les infrastructures cyclables, de l'amélioration de la sécurité des déplacements et de la diffusion d'une véritable culture de la mobilité active.

Nous avons également souhaité mettre en lumière le développement de nouveaux usages professionnels, comme la cyclologistique et les vélos-cargos, qui offrent des solutions particulièrement adaptées à certains déplacements urbains de marchandises ou de services. Sans se substituer aux véhicules motorisés, ces solutions peuvent contribuer utilement à réduire les émissions tout en améliorant la qualité de vie dans les centres urbains.

Je redonne maintenant la parole à Jean-Luc Fugit qui va évoquer un sujet sensible, celui des zones à faibles émissions.

M. Jean-Luc Fugit, député, vice-président de l'Office, corapporteur. – J'en viens maintenant à un sujet qui a suscité de nombreux débats, tant dans notre pays qu'au sein du Parlement : les zones à faibles émissions mobilité.

J'insiste sur cette dénomination, introduite par la loi d'orientation des mobilités, afin de les distinguer clairement des autres catégories de zones à faibles émissions.

Les ZFE-m participent indirectement à la décarbonation en favorisant le renouvellement du parc automobile, mais elles ont évidemment d'abord été créées pour répondre à un objectif de santé publique. La question des ZFE-m a néanmoins été régulièrement évoquée au cours de nos auditions, ce qui montre que même pour les acteurs du domaine, les enjeux de qualité de l'air et de décarbonation sont étroitement liés, en termes d'acceptabilité sociale. Et c'est encore plus vrai pour le grand public.

Les études montrent que l'exposition des populations à la pollution atmosphérique est responsable d'impacts sanitaires importants et que les bénéfices attendus des ZFE-m en matière de qualité de l'air sont réels.

Les auditions et les études menées en France comme en Europe montrent toutefois que leur acceptabilité dépend étroitement des conditions de leur mise en œuvre. Les réalités territoriales sont très différentes d'une agglomération à une autre. Les possibilités de report modal ne sont pas les mêmes partout. La capacité financière des ménages à s'adapter varie fortement. Les besoins des entreprises de transport ou des artisans sont également très hétérogènes.

Nous considérons donc que l'efficacité du dispositif repose sur un équilibre entre ambition environnementale, adaptation aux réalités locales et accompagnement des usagers. C'est pourquoi nous proposons notamment de renforcer la capacité des collectivités territoriales à adapter ce dispositif aux réalités locales.

Pour conclure, je vais dire quelques mots de nos recommandations. Notre rapport en comporte, au total, vingt-six. Je ne les présenterai évidemment pas toutes. Je souhaite simplement insister sur quelques orientations générales.

La première est la nécessité de donner davantage de stabilité aux politiques publiques. De nombreux acteurs nous ont indiqué que les changements fréquents des dispositifs de soutien, des règles fiscales ou des calendriers réglementaires compliquaient leurs décisions d'investissement. La transition écologique est un processus de long terme. Elle suppose une visibilité suffisante.

La deuxième orientation concerne le renouvellement du parc automobile. Nous considérons que les aides publiques doivent progressivement évoluer vers des dispositifs plus lisibles, plus prévisibles et davantage orientés vers les ménages qui en ont le plus besoin. Le développement du marché de l'occasion constitue également un enjeu majeur. En volume, il représente déjà un marché plus de trois fois supérieur à celui du véhicule neuf. Il jouera donc un rôle décisif dans la démocratisation de la mobilité électrique.

La troisième orientation porte sur les infrastructures. L'attention se concentre souvent sur le nombre de bornes de recharge publiques. Or les auditions montrent que les principaux défis concernent désormais la recharge à domicile, les copropriétés, les entreprises et les infrastructures destinées aux poids lourds. Là encore, une programmation de long terme, avec une continuité des politiques, apparaît indispensable.

Enfin, la dernière orientation est plus générale. La décarbonation des transports est un défi à la fois climatique, industriel, énergétique et scientifique. Elle intervient dans un contexte marqué par une concurrence internationale extrêmement forte, notamment dans les batteries, les véhicules électriques ou les matières premières critiques. L'Europe devra donc concilier plusieurs objectifs : réduire ses émissions, préserver sa compétitivité, renforcer sa souveraineté industrielle et sécuriser ses approvisionnements. Ces objectifs ne sont pas contradictoires. Ils doivent être poursuivis simultanément.

Nos vingt-six recommandations ne visent pas à promouvoir une technologie plutôt qu'une autre. Elles cherchent avant tout à créer les conditions d'une transition réaliste, fondée sur les connaissances scientifiques disponibles, ouverte aux évolutions technologiques et compatible avec les contraintes économiques de nos concitoyens comme de nos entreprises.

Nous espérons que ces propositions pourront utilement nourrir le débat parlementaire qui sera organisé, conformément à la loi d'orientation des mobilités, à l'Assemblée nationale et au Sénat.

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office. – Je souhaite faire quelques observations sur un certain nombre de points de votre rapport pour lequel je vous remercie.

La transition est nécessaire et elle doit se faire aussi dans les têtes. La voiture a l'avantage d'être toujours mobilisable alors que le covoiturage, par exemple, nécessite un effort.

Parmi vos propositions, je note qu'il y a beaucoup de mesures à caractère fiscal, comme l'instauration d'un taux de TVA réduit pour l'acquisition de véhicules à faibles émissions. Or, nous devons tenir compte des capacités financières de la France.

D'ailleurs, certaines mesures pourraient ne rien coûter à l'État. Je pense à un dispositif que j'avais vu en Norvège lors d'un déplacement effectué dans le cadre du rapport que j'avais réalisé pour l'Office sur l'arrêt de la commercialisation des véhicules thermiques à

l'horizon 2040. Il s'agissait de mettre à contribution les sociétés d'autoroute pour soutenir la mobilité électrique.

De la même façon, on observe la mobilisation d'investissements par les acteurs privés, comme TotalEnergies, pour le déploiement des infrastructures de recharge.

Au-delà de la vignette Crit'Air, pourrait-on imaginer une sorte d'écoscore sur les véhicules, lié à l'énergie utilisée ?

J'émet un petit doute sur la complémentarité des filières techniques. Par exemple, l'électrification des véhicules s'impose sans conteste, mais vouloir développer l'hydrogène, n'est-ce pas courir un lièvre de trop ?

Enfin, j'aimerais savoir si le coût du retrofit en fait une solution rentable.

M. Pierre Médevielle, sénateur, corapporteur. – Des mécanismes incitatifs existent déjà sur certaines autoroutes, où les péages applicables aux poids lourds peuvent être modulés en fonction de leurs émissions. Nous proposons de les généraliser.

Par ailleurs, les diverses aides que nous envisageons devraient, au moins en partie, être compensées par le produit du malus qui pénalise les véhicules les plus émetteurs.

''Parallèlement, il convient de progresser dans la recherche de complémentarités entre les différentes solutions de décarbonation. Une telle démarche est déjà engagée dans le secteur aérien, où le poids des batteries limite l'électrification aux appareils très légers ou à certaines motorisations hybrides. De ce fait, le recours aux carburants d'aviation durables, ou SAF, est sérieusement envisagé, malgré leur coût encore élevé. En revanche, la généralisation de solutions à base d'hydrogène y apparaît moins évidente. Pour les transports terrestres, une complémentarité entre l'électrification à batterie et le recours aux biocarburants ou à l'hydrogène décarboné apparaît également pertinente.

Enfin, cette réflexion doit tenir compte de l'évolution de la concurrence internationale. À cet égard, je voudrais insister sur le fait qu'il existe aujourd'hui 47 marques chinoises de poids lourds électriques. Il faut avoir conscience de l'ampleur de cette concurrence.

M. Jean-Luc Fugit, député, vice-président de l'Office, corapporteur. – L'objectif est de sortir des énergies fossiles. L'électrification sera massive mais ne sera pas la solution exclusive. Dans cette perspective, le biogaz peut être une solution complémentaire pour les véhicules thermiques. De fait, la loi d'orientation des mobilités ne vise pas à interdire ceux-ci, mais à mettre fin à l'usage des carburants fossiles.

On n'est pas arrivé au bout de ce que l'on peut réaliser avec l'hydrogène. Pour les véhicules particuliers, l'hydrogène demeure complexe à mettre en œuvre, mais les opportunités sont plus ouvertes pour les transports « lourds ». Lorsqu'il est produit par un procédé bas-carbone – et c'est en fait là le véritable enjeu –, il peut néanmoins être utilisé aussi bien avec un moteur électrique, *via* une pile à combustible, que dans un moteur thermique adapté.

Le retrofit s'inscrit dans cette même logique de diversification des solutions : il est un levier, parmi d'autres, pour décarboner les transports.

L'un des freins au développement de la mobilité électrique tient à la difficulté de connaître à l'avance le coût d'une recharge, alors que celui d'un plein de carburant est facilement identifiable. Aussi, il est indispensable d'assurer davantage de stabilité et de lisibilité à la tarification de la recharge, notamment lorsque l'on prend en compte le fait qu'un véhicule neuf sur deux en France est acheté par une entreprise.

M. Pierre Médevielle, sénateur, corapporteur. – En matière de fiscalité, le point de bascule interviendra lorsque la baisse du produit des taxes sur les carburants fossiles sera devenue si importante qu'elle conduira à établir des taxes similaires sur les véhicules à batterie.

M. Lionel Duparay, député. – L'hydrogène est une bonne solution pour le stockage de l'énergie mais pas pour la mobilité. La production d'un kilogramme d'hydrogène par électrolyse nécessite 20 litres d'eau, dont la moitié est consommée dans le processus. Or, il y a déjà une difficulté d'accès à l'eau pour les centrales nucléaires. Le transport et la distribution de l'hydrogène posent également des difficultés non négligeables.

Ne faudrait-il pas envisager, comme cela existe en Chine, des points de changement des batteries, plutôt que des stations de recharge ? Cela pourrait procurer un gain de temps appréciable, en particulier pour les poids lourds. En tout état de cause, il faut très rapidement s'interroger sur la meilleure façon de réalimenter un véhicule électrique.

Vous préconisez le développement d'un marché de l'occasion des véhicules électriques. Or ceux-ci s'usent moins rapidement que les véhicules thermiques et connaissent moins de défaillances techniques, surtout si l'on met en place un système de changement de leurs batteries. Donc ces véhicules peuvent être conservés plus longtemps, ce qui ne peut que nuire à la mise en place du marché de l'occasion.

On entend souvent dire que la mobilité électrique est peu compatible avec la ruralité. La réalité est plus nuancée : le principal problème vient de l'autonomie des véhicules alors qu'au contraire, la recharge est plus aisée qu'en milieu urbain. D'ailleurs, lorsqu'un ménage rural dispose de deux véhicules, la combinaison véhicule thermique / véhicule électrique lui offre une bonne complémentarité.

Le principe des aides à la mobilité électrique est de compenser en partie l'écart de prix entre le véhicule électrique et le véhicule thermique. De ce fait, il est tout à fait légitime de moduler les aides selon des critères définis, dès lors que leur lisibilité est assurée. Le système du leasing social est pour moi un cas d'école : avec le plafonnement à 10 000 km par an, il consiste en fait à aider des personnes qui roulent peu. Cela mériterait une étude d'impact, qui aurait vocation à rapporter le coût des aides au nombre de kilomètres roulés en mobilité électrique.

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office. – Je trouve cette idée intéressante, d'autant que le coût d'usage d'un véhicule se constate surtout « à la pompe » ou « à la prise ». L'intérêt économique des voitures électriques est net à partir de 100 à 150 kilomètres parcourus par jour.

M. Jean-Luc Fugit, député, vice-président de l'Office, corapporteur. – Il existe actuellement des bornes de recharge ultrarapides qui peuvent s'avérer plus intéressantes que le changement des batteries. Les progrès ont été très rapides ces dernières années.

Nous avons aussi noté que l'entretien des véhicules électriques est plus simple, ce qui entraînera une évolution des métiers dans les garages, avec moins de mécanique et des conséquences possibles sur l'emploi.

Enfin, le leasing social présente l'intérêt de permettre une véritable démocratisation et donc un développement massif de la mobilité électrique. Cette progression doit s'accompagner du déploiement d'infrastructures de recharge adaptées aux usages quotidiens. À cet égard, il est important que des bornes de recharge soient installées dans les parkings des entreprises.

M. Pierre Médevielle, sénateur, corapporteur. – L'évolution technologique actuelle des véhicules électriques et des batteries est assez spectaculaire, certaines offrant désormais, dans des conditions optimales, une autonomie pouvant atteindre 1 000 kilomètres.

Pour assurer le développement du marché de l'occasion, il faudra également réfléchir aux modalités de garantie des batteries, afin de renforcer la confiance des acquéreurs.

Peu à peu, les réticences à la décarbonation des mobilités disparaîtront.

L'Office adopte à l'unanimité le rapport sur l'évaluation de la décarbonation des transports terrestres et autorise sa publication.

*
* *

Examen de la note scientifique sur l'hydrogène natif (Gérard Leseul, député, et Michaël Weber, sénateur, rapporteurs)

M. Michaël Weber, sénateur, corapporteur. – Monsieur le Président, Monsieur le Premier Vice-Président, mes chers collègues, je dois d'abord excuser l'absence de Gérard Leseul, corapporteur de ce travail, retenu à la commission de développement durable de l'Assemblée nationale.

En introduction, je souhaite rappeler que près de 100 millions de tonnes d'hydrogène sont produites chaque année, essentiellement utilisées pour le raffinage pétrolier et l'industrie chimique, en particulier la production d'engrais. Mais 96 % de cette production provient d'énergies fossiles, entraînant le rejet de dioxyde de carbone.

Depuis une décennie, les études faisant état de gisements potentiels d'hydrogène naturel à travers le monde se sont multipliées, laissant espérer que cet hydrogène « blanc » puisse contribuer de manière significative à un avenir à zéro émission nette de carbone. Pourtant, aucun gisement important d'hydrogène naturel exploitable à des conditions rentables n'a été découvert à ce jour. Aussi, mon collègue Gérard Leseul et moi-même avons cherché à comprendre quel était le réel potentiel de l'hydrogène comme nouvelle source d'énergie.

Nous allons présenter la note en trois parties.

La première s'intéresse à la répartition de l'hydrogène sur la Terre, à ses mécanismes géochimiques de production et aux avantages de l'hydrogène naturel comme source d'énergie.

La deuxième partie constate le décalage entre une exploration en plein essor et des résultats encore limités et fait le point sur les incertitudes scientifiques et les défis à surmonter pour une exploitation commerciale de l'hydrogène.

Enfin, la troisième partie s'attache à montrer pourquoi la France doit agir maintenant afin de maintenir son avance technologique et de s'imposer comme leader technologique mondial dans ce domaine.

Le sujet de l'hydrogène naturel est largement documenté à l'échelle mondiale. On en trouve sur tous les continents. Il se présente à l'état naturel sous forme gazeuse dans les roches poreuses du sous-sol, où il est généralement mélangé à d'autres gaz comme l'azote, l'hélium et le méthane, ou dissous dans les eaux souterraines.

Plusieurs mécanismes contribuent à la production d'hydrogène naturel, mais seuls trois d'entre eux sont susceptibles de conduire à des accumulations d'hydrogène naturel exploitables économiquement : les réactions d'oxydoréduction ; la radiolyse ; la maturation des matières organiques. Je vais les décrire rapidement.

Les réactions d'oxydoréduction entre l'eau et certaines roches riches en fer se caractérisent par une oxydation des roches et une transformation de l'eau en dihydrogène dans des conditions hydrodynamiques spécifiques. Le principe repose sur un échange d'électrons entre les deux éléments :

- au contact de l'eau, le fer ferreux contenu dans la roche (Fe^{2+}) agit comme un réducteur : il donne des électrons et se transforme en fer ferrique (Fe^{3+}) ;

- en récupérant les électrons cédés par le fer de la roche, l'hydrogène de l'eau (H_2O) se réduit pour former du dihydrogène gazeux (H_2).

La serpentinisation est le processus le plus connu de l'hydratation et de l'oxydation des roches ultramafiques et mafiques contenant de l'olivine et du pyroxène. D'autres formations rocheuses comme les granites et les formations de fer rubané peuvent produire de l'hydrogène par oxydoréduction. Les cinétiques sont optimales à haute température (200 à 350 °C), mais des réactions de serpentinisation pourraient se poursuivre jusqu'à des températures inférieures à 50 °C dans certaines conditions.

La radiolyse de l'eau est une autre réaction de production d'hydrogène naturel à grande échelle. Elle consiste en une rupture des liaisons O-H de l'eau par les rayonnements ionisants produits lors de la désintégration radioactive de l'uranium, du thorium et du potassium. De l'hélium est également produit au cours de cette désintégration. La radiolyse concerne toutes les roches continentales radioactives, la plus connue étant le granite. Elle peut prendre plusieurs milliards d'années.

L'hydrogène naturel peut également être produit par maturation de la matière organique : lorsque des sédiments riches en carbone s'enfoncent profondément dans la croûte terrestre, la chaleur et la pression provoquent un craquage moléculaire. À très haute température, les chaînes hydrocarbonées se brisent, libérant non seulement du méthane, mais

aussi de l'hydrogène. Parmi les roches riches en matière organique figurent les charbons et les schistes noirs. La maturation de la matière organique est plus ou moins rapide en fonction de la température, mais elle peut prendre des centaines de millions d'années.

Toutefois, il ne suffit pas que les conditions de formation de l'hydrogène soient réunies pour pouvoir envisager son exploitation.

De même, les suintements, sources et dépressions subcirculaires d'hydrogène donnent des indications intéressantes sur les flux d'hydrogène, mais ne permettent pas d'évaluer les ressources. Ainsi, l'absence de signalement d'hydrogène peut constituer un faux négatif car les instruments de mesure indiquent les fuites d'hydrogène et non la présence du gaz dans le sous-sol.

Les phénomènes de surface peuvent également causer des faux positifs en raison de l'activité microbienne de surface ou des réactions chimiques lors du forage.

Dans la réalité, les gisements d'hydrogène résultent d'un « système hydrogène », qui repose sur quatre piliers : une source représentée par les roches génératrices, des voies de migration, une roche-réservoir et une roche de couverture.

Plusieurs roches sont susceptibles de produire de l'hydrogène. Dans le cadre des réactions d'oxydoréduction et de la radiolyse, les roches génératrices doivent présenter une chimie favorable (haute teneur en fer ferreux ou forte concentration en éléments radioactifs) ainsi qu'un réseau de microfractures permettant à l'eau de s'infiltrer pour alimenter en continu la réaction de génération d'hydrogène.

Comparé aux hydrocarbures, l'hydrogène est une molécule très petite. Dès qu'il se forme, il migre hors de la roche génératrice selon deux mécanismes :

- par advection : le transport de l'hydrogène s'effectue soit dissous dans l'eau (il suit alors les aquifères), soit sous forme de gaz libre. L'advection permet une migration ciblée le long de voies perméables telles que des fractures, des failles ou des couches poreuses ;

- par diffusion : les molécules d'hydrogène se déplacent spontanément sous l'effet d'un gradient de concentration de manière plutôt multidirectionnelle.

À grande profondeur, sous l'effet de la pression hydrostatique, l'hydrogène migre dissous dans l'eau le long des aquifères. À une profondeur moindre, lorsque la pression diminue, l'hydrogène se dégage sous forme de gaz, formant ainsi des accumulations de gaz ou s'échappant dans l'atmosphère.

L'hydrogène étant un gaz hautement mobile, la roche-réservoir doit être dotée d'une porosité élevée pour offrir un espace pour stocker le gaz et d'une perméabilité suffisante pour la circulation des fluides. Parmi les roches de stockage typiques, on trouve les grès poreux ainsi que les roches fissurées telles que les carbonates ou les roches mères cristallines dotées de réseaux de fissures bien développés.

La quantité d'hydrogène naturel pouvant être potentiellement extraite dépend largement de sa capacité à s'accumuler dans des structures de piégeage. Sans une couche imperméable située au-dessus de la roche réservoir, l'hydrogène s'échappe vers la surface. En l'état actuel des connaissances, les roches de couverture privilégiées par les scientifiques sont

le sel et certaines argiles saturées en eau. Lorsque l'hydrogène est dissous dans un aquifère, il n'y a probablement pas besoin de piège.

J'en viens maintenant aux avantages de l'hydrogène naturel par rapport aux autres types d'hydrogène.

L'hydrogène vert, produit par électrolyse de l'eau avec de l'électricité renouvelable, est propre, mais son coût reste élevé : de 10 à 15 euros par kilogramme en France. L'hydrogène gris, issu du gaz naturel, est moins cher (1 à 2 euros/kg), mais sa production émet beaucoup de CO₂. L'hydrogène noir, produit à partir de charbon, est encore plus polluant.

L'hydrogène natif, lui, pourrait coûter entre 0,5 et 1 euro par kilogramme – un prix compétitif, voire inférieur à celui de l'hydrogène gris, tout en étant 100 % bas carbone. C'est cette équation magique – abondance + faible coût + zéro émission – qui en fait une piste si attrayante. Toutefois, pour l'instant, ces coûts sont théoriques et aucun gisement n'a encore été exploité à grande échelle.

J'en viens ainsi à notre deuxième partie qui constate le décalage entre une exploration en plein essor et des résultats encore limités, et s'intéresse aux incertitudes scientifiques et aux défis à surmonter pour une exploitation commerciale de l'hydrogène.

Depuis cinq ans, le nombre de publications sur l'hydrogène naturel a été multiplié par 20 et de nombreuses entreprises, essentiellement des *start-up*, se sont lancées dans l'exploration de l'hydrogène naturel. Au niveau international, des projets d'exploration d'hydrogène sont en cours sur tous les continents à des degrés plus ou moins avancés. En effet, le nombre de pays ayant adapté leur législation afin de délivrer des permis d'exploration de l'hydrogène naturel est encore réduit. Néanmoins, la réalité du terrain est plus contrastée. En dehors du Mali dont je parlerai plus tard, entre 20 et 40 puits ont été forés sur tous les continents, en particulier aux États-Unis et en Australie, mais également en Colombie, en Chine et même en France. Néanmoins, à ce jour, ces opérations n'ont donné lieu à aucune publication de données certifiées ou de résultats validés par des pairs dans des revues scientifiques.

Actuellement, un seul site est exploité dans le monde, le site de Bourakébougou dans le bassin du Taoudeni au Mali. L'hydrogène y est stocké à l'état gazeux libre à faible profondeur. Il est produit presque pur (environ 98 %). En revanche, le débit du puits historique principal s'élève à seulement 1 500 m³ par jour, soit 48 tonnes par an, l'équivalent de l'énergie contenue dans 3 barils de pétrole. Par comparaison, les puits à haut rendement des gisements de gaz naturel de la mer du Nord produisent plus de 2 millions de mètres cubes par jour. Il convient de rappeler qu'une usine d'engrais utilise en moyenne 300 000 tonnes d'hydrogène par an.

En réalité, l'exploitation commerciale de l'hydrogène se heurte à des incertitudes scientifiques et à de nombreux défis techniques, financiers et culturels.

Je vais d'abord vous présenter de manière non exhaustive les incertitudes scientifiques qui entourent les « systèmes hydrogène ».

Certaines portent sur la formation et la migration. La vitesse des réactions de production d'hydrogène varie en fonction de la température, de la pression, du rapport eau/roche, de la salinité du fluide ou encore de la composition chimique des roches et des fluides. Les catalyseurs naturels sont mal connus tandis que la serpentinisation de l'olivine, processus clé pour la production d'hydrogène, s'accompagne d'autres réactions géochimiques qui peuvent entraver la production d'hydrogène.

La précipitation de minéraux secondaires peut entraîner une passivation des surfaces : en se déposant de manière homogène sur les parois des microfractures, ils forment une barrière étanche et isolent le cœur de la roche de tout contact futur avec l'eau. La production d'hydrogène s'arrête net, laissant une roche riche en fer mais devenue stérile.

Les effets de ces réactions couplées restent particulièrement difficiles à modéliser en raison de leur complexité (antagonisme de certaines réactions, cinétique et rendements variables, *etc.*).

Les roches à fort potentiel d'hydrogène (péridotites) sont des roches peu poreuses et peu perméables. Pourtant, la majorité des péridotites et des autres roches potentiellement sources d'hydrogène observées à la surface de la Terre sont fortement altérées, ce qui suppose des mécanismes efficaces de circulation des fluides. Ils restent encore peu étudiés, ce qui limite la capacité à prédire le potentiel de production en hydrogène de ces zones reconnues comme propices.

L'accumulation et la préservation de l'hydrogène soulèvent également de nombreuses interrogations scientifiques.

L'accumulation de l'hydrogène est entravée par sa diffusivité exceptionnelle qui entraîne sa fuite vers la surface (« leaking ») à travers la roche de couverture. Le processus de diffusion est lent, mais il pourrait être suffisant à l'échelle des temps géologiques pour vider un réservoir qui ne serait pas alimenté en continu.

Un autre obstacle à l'accumulation de l'hydrogène est sa réactivité chimique et microbiologique. L'hydrogène a une électronégativité modérée et une petite taille atomique, ce qui facilite les échanges d'électrons ou la formation de liaisons avec d'autres éléments. Des réactions géochimiques associant l'hydrogène peuvent intervenir à des températures supérieures à 200°C : réduction des oxydes métalliques (oxyde de fer ou de manganèse) et oxydation de l'hydrogène en eau ; réduction du CO₂ pour former du méthane ; réduction des sulfates pour produire du sulfure d'hydrogène.

À des températures inférieures à 100°C, l'hydrogène est source d'énergie pour le vivant, et les micro-organismes du sous-sol jouent un rôle majeur dans la consommation et la transformation de l'hydrogène. Par conséquent, les pièges à hydrogène se trouveraient à une profondeur où la température est comprise entre 100 et 200°C, bornes entre lesquelles l'hydrogène est moins réactif.

Au-delà des incertitudes scientifiques, la rentabilité de l'exploitation commerciale de l'hydrogène dépend de nombreux paramètres.

Il y a d'abord des verrous technologiques à lever pour extraire l'hydrogène dissous, comme c'est le cas à Forschviller. La Française de l'Énergie, qui a mis en évidence du gaz dissous dans l'aquifère des formations carbonifères lors d'un récent forage à 3 662 mètres,

souhaiterait utiliser la sonde SysMoG de Solexperts et ses surfaces membranaires pour séparer le gaz de l'eau en profondeur. La pression différentielle (plus de 100 bars) permettrait d'assurer la remontée du gaz en surface. Il s'agit néanmoins de technologies de rupture en cours de développement et les faisabilités techniques et économiques ne sont pas encore démontrées. En revanche, les méthodes envisagées pour l'extraction de l'hydrogène sous forme de gaz libre sont celles classiquement déployées pour l'exploitation de réservoirs d'hydrocarbures sous pression.

La concentration en hydrogène et la composition du gaz résiduel sont des paramètres de rentabilité décisifs car elles déterminent les besoins en énergie et les coûts de séparation du gaz pour la purification de l'hydrogène.

La présence d'hélium peut cependant rendre rentable l'exploitation de gisements d'hydrogène en raison de la valeur marchande de ce gaz : l'hélium est un gaz rare indispensable dans de nombreux secteurs industriels tandis que l'offre est limitée par le nombre de gisements exploitables.

Le débit et la pression ont également des impacts significatifs sur les coûts de production. Des débits de production importants entraînent une baisse des coûts unitaires grâce aux économies d'échelle. Le débit auquel l'hydrogène devrait être produit pour être rentable est évalué à plusieurs kilotonnes par an et par puits. La pression du réservoir influence directement sur le débit de la production d'hydrogène : une pression élevée facilite l'extraction et améliore l'efficacité globale du processus de production.

En ce qui concerne la quantité totale d'hydrogène présente dans le gisement, elle détermine la durée pendant laquelle un débit donné peut être maintenu. Dans le domaine de l'exploration gazière, la durée d'exploitation varie entre 15 et 30 ans pour une installation de production.

La profondeur du gisement est un paramètre important pour le coût du forage : plus il est profond, plus il est coûteux.

Enfin, la proximité des consommateurs sera, au moins à dans un premier temps, une condition *sine qua non* pour le développement de l'hydrogène naturel. En effet, son transport est techniquement complexe et coûteux. Par conséquent, sa rentabilité économique sera plus probable lorsque les consommateurs se trouveront à proximité du gisement.

L'exploitation de l'hydrogène naturel en France se heurte également à des obstacles réglementaires, financiers et culturels.

La phase de recherche implique la délivrance d'un permis exclusif de recherche, procédure plus longue que dans d'autres pays (18 mois en France contre 3 à 6 mois en Allemagne). Deux raisons sont régulièrement avancées : des procédures d'autorisation séquentielles plutôt que parallèles ; des ressources humaines pour l'instruction des demandes insuffisantes et peu formées aux questions liées au sous-sol alors même que les dossiers sont de plus en plus complexes. Les demandes de concession de production sont réputées encore plus lentes, pouvant aller jusqu'à trois ans.

Par ailleurs, le code minier ne facilite pas l'accès aux données préexistantes. Par exemple, les données sismiques sont accessibles dans un format qui ne permet pas de les utiliser sans un retraitement préalable, ce qui engendre des coûts et des délais supplémentaires.

Le forage reste le seul moyen de confirmer l'existence d'un gisement souterrain d'hydrogène, de mesurer la pression, les débits et la composition du gaz, et d'évaluer la rentabilité économique. Mais son coût est élevé (entre 2 et 20 millions d'euros), ce qui constitue une réelle difficulté pour les sociétés d'exploration, aujourd'hui essentiellement des *start-up*.

Enfin, nous regrettons une perte d'intérêt de la France pour son sous-sol. Les ressources du sous-sol ont vocation à jouer un rôle essentiel dans la transition, mais également pour la souveraineté énergétique de notre pays. Elles sont cependant mal connues du grand public et leur exploitation souffre d'une acceptation sociale faible et d'un relatif désintérêt des décideurs politiques.

Pourtant, si l'hydrogène naturel s'avère exploitable commercialement, la France possède de nombreux atouts pour s'approprier rapidement cette nouvelle ressource énergétique. C'est la raison pour laquelle elle doit agir. C'est l'objet de la dernière partie de cette présentation.

La France dispose d'atouts majeurs pour devenir un leader de l'hydrogène natif. D'abord, sa géologie est favorable à la présence d'hydrogène. Dans le Bassin aquitain et le Piémont pyrénéen, on trouve des roches ultramafiques propices à la serpentinisation. La Lorraine se caractérise par des bassins sédimentaires riches en matière organique. Dans les outre-mer, les massifs ophiolitiques de la Nouvelle-Calédonie ainsi que la Guyane possèdent les caractéristiques géologiques favorables à l'hydrogène naturel, même si en Guyane, aucune étude exploratoire n'a été réalisée à ce jour.

Ce n'est d'ailleurs pas un hasard si six permis de recherche exclusifs d'hydrogène natif ont été attribués jusqu'à présent : à la société TBH2 à Sauveterre et à Coucourou dans les Pyrénées-Atlantiques, au consortium 45-8/STO à Grand Rieu dans les Pyrénées-Atlantiques et à Marensin dans les Landes, à la Française de l'Énergie aux Trois-Évêchés en Meurthe-et-Moselle/Moselle et au consortium G&OI/Mantle 8 à Comminges en Haute-Garonne/Hautes-Pyrénées.

Par ailleurs, notre pays peut compter sur une avance scientifique reposant sur plus de dix ans de programmes de recherche et sur une filière de l'hydrogène et du « para hydrogène » dynamique structurée autour du pôle de compétitivité AVENIA dans le cadre de l'initiative européenne sur l'hydrogène natif Earth2.

Enfin, l'hydrogène naturel représente une opportunité économique et stratégique à ne pas négliger. L'exploitation de l'hydrogène natif pourrait relancer des bassins industriels en déclin. Elle aiderait à réduire nos importations d'énergies fossiles et surtout permettrait à la France de vendre son savoir-faire en exploration et exploitation à d'autres pays.

La France a donc une carte à jouer. Parce que nous ne pouvons pas nous permettre de passer à côté de cette opportunité, nous vous proposons six recommandations afin que notre pays conserve son avance scientifique et consolide son leadership technologique mondial dans le domaine de l'hydrogène naturel.

Première proposition : développer un récit autour du sous-sol national afin de sensibiliser les décideurs politiques et les citoyens sur le caractère stratégique des ressources du sous-sol et le potentiel français.

Deuxième proposition : consacrer 10 millions d'euros à un programme national de recherche pluridisciplinaire sur 10 ans sur l'hydrogène et l'hélium et débouchant sur un ou deux forages profonds afin de caractériser les systèmes liés à ces ressources.

Troisième proposition : sanctuariser la contribution de la France aux deux programmes internationaux de forage scientifique (*International Continental Scientific Drilling Program* et *International Ocean Drilling Program*) afin de maintenir l'expertise française dans la connaissance du sous-sol.

Quatrième proposition : mettre en place une enveloppe de 10 millions d'euros d'avances remboursables pour contribuer à la réalisation d'un forage exploratoire pour chacun des projets français les plus avancés lorsqu'ils s'accompagnent d'un programme scientifique public associé.

Cinquième proposition : faire évoluer le droit minier pour permettre l'accès libre aux données sismiques retraitées et simplifier les processus d'octroi de permis de recherche et de licences d'exploitation.

Sixième proposition : soutenir, dans la compétition énergétique internationale, la reconnaissance de l'hydrogène naturel comme source de production bas carbone au niveau européen, en révisant la stratégie hydrogène de l'Union européenne dès 2027.

L'hydrogène natif n'est pas une solution miracle. Il ne remplacera pas, à lui seul, le pétrole, le gaz ou les énergies renouvelables. Mais il pourrait devenir une brique essentielle de notre mix énergétique futur – propre, compétitive et souveraine.

La France a une fenêtre d'opportunité : celle d'un pays qui, grâce à sa géologie, son expertise et sa volonté politique, pourrait devenir un leader mondial de cette ressource. Mais cette fenêtre ne restera pas ouverte indéfiniment. D'autres pays – les États-Unis, l'Australie, la Chine – avancent vite. Nous ne pouvons pas nous permettre de rester à la traîne et nous devons convaincre les autres pays de l'Union européenne d'unir leurs efforts dans cette compétition internationale autour de l'hydrogène natif.

M. Jean-Luc Fugit, député, vice-président de l'Office. – Cette note scientifique constitue un travail très intéressant. À propos du gisement en Lorraine, pouvez-vous nous donner des explications supplémentaires sur la cinétique de la réaction à l'origine de la production d'hydrogène et sur son caractère renouvelable ? L'un des paramètres décisifs de la rentabilité de l'exploitation de l'hydrogène natif sera son état de pureté. L'électrolyse verte reste un processus cher, mais elle a l'avantage de produire de l'hydrogène pur. Avez-vous une idée des coûts de purification de l'hydrogène naturel ? Vous avez évalué le montant des avances remboursables que devrait accorder l'État aux projets d'exploration les plus avancés à 10 millions d'euros. Est-ce que cette somme est réellement suffisante ?

Mme Dominique Voynet, députée. – Vous avez expliqué que d'autres États s'étaient lancés dans la course à l'hydrogène natif. Lesquels sont les plus avancés ? Ont-ils lancé des programmes de recherche ? Est-ce que l'Europe est également impliquée dans le développement de cette nouvelle source d'énergie ?

M. Michaël Weber, sénateur, corapporteur. – Sur le site des Trois-Évêchés sur lequel a été réalisé le forage à 3 662 mètres de profondeur, il semblerait que les processus géologiques – réaction de l’eau avec certaines roches riches en fer – pourraient produire de l’hydrogène en continu sur de très longues périodes, ce qui pourrait amener à considérer la ressource comme renouvelable.

L’un des obstacles à l’exploitation rentable de l’hydrogène est moins la profondeur du puits à creuser que le transport de cette ressource, complexe et coûteux. Par ailleurs, la purification de l’hydrogène natif ne semble pas obérer outre mesure le coût total d’exploitation. L’hydrogène trouvé sur le site des Trois-Évêchés est dissous dans l’eau, donc loin d’être pur, ce qui constitue une difficulté pour une exploitation rentable de cette ressource.

Nous proposons, parmi nos six recommandations, d’accorder une avance de 10 millions d’euros pour chaque forage lié à un projet d’exploration très avancé. Au total, cinq projets semblent remplir ce critère, le montant total des avances remboursables s’élèverait donc à 50 millions d’euros. Ce n’est certainement pas suffisant, mais cela démontrerait l’intérêt de l’État pour cette ressource et permettrait de faire avancer les recherches scientifiques quelle que soit l’issue du forage.

Cela est d’autant plus important que la France a une réelle avance technologique dans ce domaine, mais la plupart des sociétés impliquées sont des *start-up* qui ne peuvent pas assurer seules la prise de risque. Actuellement, les grandes entreprises énergétiques observent et « paient pour voir ». En outre, d’autres pays comme les États-Unis, l’Australie ou la Chine accentuent leurs investissements dans l’exploration de l’hydrogène natif et sont en train de nous rattraper. Les États-Unis ont ainsi lancé un programme de recherche de 20 millions de dollars, signe très positif pour les investisseurs privés qui commencent à affluer. En Europe, plusieurs pays ont une géologie propice à l’hydrogène natif, comme la Bosnie ou l’Espagne.

L’hydrogène natif représente une réelle opportunité pour la France qui ne peut pas se permettre de la laisser passer. Il faut donc débloquer des moyens financiers afin de pouvoir rester leader dans ce secteur.

M. Pierre Henriet, député, premier vice-président de l’Office. – Je souhaiterais avoir quelques précisions. La note mentionne des niveaux de production d’hydrogène très disparates selon les études, entre 1,74 million de tonnes pour la Royal Society et 23 millions de tonnes pour Viatcheslav Zgonnik. Comment expliquer ces différences ?

Par ailleurs, est-ce que l’ANR et le BRGM sont impliqués dans l’amélioration des connaissances sur les systèmes hydrogène ?

Vous avez évoqué l’exemple de l’exploitation de l’hydrogène au Mali. Est-elle rentable compte tenu du faible débit ? Quel retour d’expérience tire la France de l’exemple malien ?

Avez-vous constaté des oppositions locales autour des sites identifiés en France ?

Enfin, ne serait-il pas opportun de traduire certaines de vos recommandations en une proposition de loi que nous pourrions porter de manière transpartisane ?

M. Michaël Weber, sénateur, corapporteur. – Les chiffres avancés – 23 millions de tonnes et 1,74 million de tonnes – correspondent aux flux géologiques d’hydrogène qui s’échappent à la surface de la Terre, mais ne donnent pas d’information sur les ressources en hydrogène présentes dans le sous-sol.

La découverte d’hydrogène naturel au Mali est le fruit du hasard. Elle a soulevé de nombreux espoirs et démontré l’existence de cette ressource et la possibilité de l’exploiter. Toutefois, actuellement, le gisement exploité permet seulement d’alimenter en électricité quelques maisons. Les débits devront être 100 à 1 000 fois supérieurs à ceux du Mali pour envisager une exploitation commerciale de l’hydrogène.

L’ANR a un rôle majeur à jouer pour financer la recherche fondamentale sur l’hydrogène. Le BRGM est une institution incontournable sur toutes les questions liées au sous-sol, et doit travailler de concert avec les chercheurs des centres de recherche et des universités. Mais des projets de recherche ne pourront être lancés que si des moyens supplémentaires sont affectés à cette problématique.

Le récit autour du sous-sol national que nous souhaitons promouvoir doit faciliter l’acceptabilité sociale de son exploration. À l’issue de nos visites et de nos auditions, nous avons le sentiment que l’hydrogène naturel dispose d’une image plutôt positive auprès des populations. En outre, contrairement à l’exploitation d’autres ressources telles que les terres rares, la surface au sol nécessaire pour l’éventuelle exploitation de l’hydrogène est réduite et le diamètre du puits est petit. Il est cependant indispensable d’associer très en amont non seulement la population, mais également les collectivités territoriales et les organisations environnementales. La transparence et le dialogue sont indispensables pour parvenir à une forte acceptabilité sociale.

Enfin, comme vous le remarquez, certaines recommandations méritent une traduction législative sur laquelle nous allons travailler.

La note scientifique sur l’hydrogène natif est adoptée à l’unanimité.

*
* *

Examen du rapport de conclusions de l’audition publique sur « Hantavirus, zoonoses, science et société : quelles leçons pour l’avenir ? »

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l’Office, corapporteur. – Mes chers collègues, nous commençons cette réunion de l’Office par l’examen des conclusions de l’audition publique intitulée « *Hantavirus, zoonoses, science et société : quelles leçons pour l’avenir ?* », organisée le 18 juin dernier.

Cette audition a fait suite au signalement par l’Organisation mondiale de la santé (OMS), le 4 mai 2026, d’un foyer d’infections à hantavirus de souche Andes à bord du *MV Hondius*, un navire de croisière battant pavillon néerlandais, alors en route vers le Cap-Vert.

Le hantavirus Andes est une espèce de virus à part entière de la famille des hantavirus. Il peut donner lieu à une zoonose, c’est-à-dire une maladie infectieuse transmise de l’animal à l’homme. Son réservoir principal est le rat pygmée de rizière à longue queue, un

petit rongeur natif d'Amérique du Sud, endémique dans certaines régions du Chili et de l'Argentine.

Identifié dès 1995, le virus Andes présente la particularité de pouvoir être transmis d'humain à humain, après la contamination initiale par ce rat pygmée. Sa létalité est élevée, ce qui le différencie de la covid-19.

Au total, 13 cas ont été recensés, entraînant trois décès, exclusivement parmi les passagers et les membres d'équipage du navire. Depuis le 25 mai, aucun nouveau cas n'a été détecté et depuis le 21 juin, tous les Français cas contacts sont sortis de leur isolement hospitalier. La semaine dernière, l'OMS a annoncé qu'en l'absence de nouveaux cas, elle déclarerait l'épidémie terminée ce jeudi 2 juillet.

Si ce foyer d'infections a fortement mobilisé les organisations internationales, les pouvoirs publics nationaux et la communauté scientifique au cours des deux derniers mois, elle a aussi donné lieu à une forme d'emballement médiatique. En retour, une perception erronée et parfois trompeuse de la menace épidémique s'est diffusée dans le débat public, ce qui n'est pas sans lien avec le traumatisme qu'a constitué la covid-19.

Face à ces réactions, et alors que les scientifiques nous alertent quant aux effets des activités humaines et de la transformation des écosystèmes sur la récurrence des épidémies, il nous est apparu pertinent avec Pierre Henriot de faire un point en organisant une audition publique.

Nous avons eu la chance d'accueillir des experts reconnus, qui nous ont permis d'atteindre un niveau de détail important sur ce sujet complexe, ce qui est toujours intéressant pour les non-spécialistes que nous sommes.

En conclusion de cette audition, nous dressons cinq constats.

D'abord, il est important de rappeler que les différentes souches de la famille des hantavirus sont connues des scientifiques depuis des décennies. Elles sont responsables de milliers de cas annuels partout dans le monde, avec une gravité variable.

Ensuite, le virus Andes à l'origine du foyer d'infections sur le *MV Hondius* se distingue des autres hantavirus à double titre : d'une part, sa létalité est élevée en comparaison des souches d'Europe et d'Asie, d'autre part, il est à ce jour le seul hantavirus capable de se transmettre de personne à personne. Toutefois, cette transmission interhumaine n'implique pas une forte contagiosité puisque la contamination requiert des contacts étroits et prolongés.

Par ailleurs, il existe un lien désormais bien documenté entre les facteurs environnementaux, climatiques et socio-économiques et l'émergence des zoonoses. La crise de mai-juin 2026 en est l'exemple.

Notre quatrième constat tient aux réactions suscitées par cette crise dans le débat public, qui ont agi comme autant de révélateurs de nos rapports aux risques infectieux. Ces rapports sont eux-mêmes marqués par la mémoire vive des épidémies passées, notamment par la mémoire récente de la covid-19.

Enfin, la gestion de cet épisode s'est appuyée sur une mobilisation institutionnelle et scientifique d'ampleur, qui a globalement su tirer les leçons des épidémies passées, à l'échelle internationale comme nationale.

Pierre Henriet va maintenant revenir plus précisément sur ces cinq constats.

M. Pierre Henriet, député, premier vice-président de l'Office, corapporteur. – Le premier constat est un rappel : celui des caractéristiques des hantavirus qui, contrairement à ce qui a pu être sous-entendu dans le débat public, n'ont pas été découverts à l'occasion du *cluster* de cas apparu sur le navire de croisière.

Au contraire, la famille des hantavirus regroupe un grand nombre de virus émergents, étudiés depuis des décennies et présents dans toutes les régions du monde. Leur première description clinique remonte à la guerre de Corée, qui a vu plus de 3 000 soldats américains contracter une fièvre hémorragique, avec un taux de létalité compris entre 10 et 15 %. Grâce aux avancées scientifiques, plusieurs souches ont ensuite pu être caractérisées, dont le virus *Hantaan*, du nom de la rivière coréenne où il a été découvert, et qui a finalement donné son nom à toute cette famille virale.

Aujourd'hui, on dénombre 41 espèces de virus appartenant au genre des Orthohantavirus, dont 25 sont pathogènes pour l'Homme.

Ces virus sont regroupés en deux grandes catégories. D'une part, les virus dits de l'Ancien Monde, répartis principalement en Europe et en Asie. Ils sont associés à une fièvre hémorragique à syndrome rénal et leur létalité est relativement faible, de l'ordre de 0,4 % à 10 % selon les souches. Ils donnent lieu à des milliers de cas chaque année, notamment en France où l'on en recense en moyenne plus de 100 par an, principalement liés à la souche Puumala, présente dans le quart Nord-Est de l'Hexagone. D'autre part, les virus dits du Nouveau Monde, identifiés sur le continent américain à partir de 1993 et associés à des syndromes cardio-pulmonaires graves. Ils représentent un nombre plus faible d'infections que les virus européens et asiatiques mais leur létalité est plus élevée, de l'ordre de 30 à 60 % selon les souches. On dénombre environ 300 cas par an.

Pour tous ces virus, il n'existe ni traitements ni vaccins approuvés. Cette situation souligne la nécessité de créer des plateformes de recherche internationales pour mutualiser les travaux et les financements.

Le deuxième constat concerne le hantavirus Andes, à l'origine du foyer d'infections sur le *MV Hondius*. Ce virus se distingue à la fois par sa létalité élevée et par sa capacité, unique parmi les hantavirus, à se transmettre d'une personne à une autre. Pour autant, cette transmission interhumaine ne signifie pas que le virus est fortement contagieux.

Identifié pour la première fois en Argentine en 1995, il présente un taux de létalité élevé, entre 25 et 30 % (23 % à ce jour pour le *cluster* apparu sur le *MV Hondius*). Comme pour la majorité des hantavirus, la contamination initiale de l'animal à l'homme se fait par l'inhalation d'aérosols contaminés par les *excreta* de rongeurs infectés. En revanche, la transmission entre humains semble nécessiter des contacts étroits et prolongés, ce qui explique le nombre limité de cas observés à bord du *MV Hondius*, alors même qu'un bateau de croisière constitue en théorie un environnement particulièrement favorable à la diffusion d'un virus.

Les données disponibles confirment cette contagiosité relativement faible. Le nombre de reproduction de base, ou R_0 , bien connu depuis la crise de la covid-19, a été estimé pour un précédent foyer à environ 2,12 ; il chute à 0,96 lorsque des mesures d'hygiène et d'isolement sont mises en œuvre. À titre de comparaison, le R_0 de la rougeole est compris entre 12 et 18.

Il convient néanmoins de souligner que des incertitudes persistent, notamment sur la durée exacte de la période de contagiosité et sur les mécanismes précis de la transmission interhumaine, ce qui met en évidence la nécessité de poursuivre les travaux de recherche dans le but d'améliorer les stratégies de prévention et de gestion sanitaire.

Troisième constat : la crise liée au hantavirus Andes est un symptôme de l'exposition croissante de nos sociétés aux zoonoses sous l'effet conjoint des activités humaines et du changement climatique.

Une étude de 2008 a mis en évidence l'augmentation du nombre de maladies infectieuses émergentes, en montrant qu'environ 60 % d'entre elles sont d'origine zoonotique. Avant le XX^e siècle, en moyenne une pandémie se déclarait par siècle. Depuis le début des années 2000, six pandémies se sont déjà produites, toutes classées parmi les zoonoses.

Deux facteurs expliquent cette tendance.

Le premier tient aux transformations de notre environnement. Le changement climatique d'origine anthropique, le déclin de la biodiversité, la déforestation ou encore l'urbanisation sont autant de bouleversements qui modifient les écosystèmes et favorisent les contacts entre la faune sauvage et les populations humaines.

Le second facteur résulte de la manière dont les sociétés humaines occupent et parcourent cet environnement en mutation. La croissance démographique, l'intensification des mobilités internationales ou encore le développement du tourisme vers des espaces naturels jusqu'alors préservés, multiplient les occasions de contacts entre l'homme et les réservoirs animaux. Le foyer survenu à bord du *MV Hondius* en est un parfait exemple puisqu'il abritait une croisière animalière.

Notre quatrième constat concerne la réception de la crise liée au hantavirus Andes dans le débat public, qui a donné lieu à un phénomène d'« infodémie », révélateur de nos rapports aux risques infectieux, hérités de représentations historiques ancrées dans les mémoires collectives.

Des réactions sans lien avec l'état réel de la menace épidémique se sont rapidement diffusées, mettant les canaux de communication institutionnels sous tension. Les comparaisons avec la covid-19 ont alimenté les inquiétudes, sans qu'elles ne soient pour autant appuyées sur des vérités scientifiques. Ainsi, au cœur de la crise, au moment du rapatriement des passagers français du bateau, l'agence de vérification de Radio France a révélé que huit des dix contenus consacrés au hantavirus les plus partagées sur Facebook étaient trompeurs ou complotistes.

Ces réactions témoignent de la persistance des représentations collectives issues des crises sanitaires passées, la pandémie de covid-19 ayant durablement accru notre sensibilité à la mort épidémique. Tous ces éléments plaident pour un renforcement des efforts de pédagogie dans la communication institutionnelle liée aux menaces infectieuses.

Notre cinquième et dernier constat dresse un bilan globalement positif de la gestion sanitaire de ce foyer d'infections.

À l'échelle internationale, l'OMS et le Centre européen de prévention et de contrôle des maladies (ECDC) ont rapidement formulé des recommandations et des lignes directrices. La communauté scientifique internationale a également fait preuve d'une forte capacité de coordination, qui se poursuit aujourd'hui avec la constitution de cohortes de suivi, articulées aux initiatives de l'Union européenne et de l'OMS.

À l'échelle nationale, la gestion de la crise s'est appuyée sur la mobilisation d'un nombre important d'acteurs et de moyens. Elle a bénéficié des enseignements tirés de la pandémie de covid-19 et de la création en 2024 d'un centre de crise sanitaire au sein de la direction générale de la santé. La réponse sanitaire s'est développée à partir d'un principe de « précaution maximale », qui s'est notamment traduit par un isolement strict des personnes exposées.

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, corapporteur. – Au regard de ces observations, nous vous proposons d'adopter quatre recommandations.

La première porte sur le travail de recherche, qu'il convient de poursuivre afin d'éclairer les mesures de prévention et d'orienter efficacement la politique de gestion sanitaire dans l'hypothèse de futurs foyers de cas à hantavirus ; hypothèse que l'on peut estimer probable, compte tenu de la récurrence de ces émergences infectieuses. Cela nécessite à la fois de renforcer les systèmes de surveillance en amont et d'encourager la constitution de cohortes de suivi des cas et de leurs contacts en aval, à l'instar du projet NAVIS piloté par l'ANRS.

La deuxième recommandation vise à encourager la mise en place de plateformes collaboratives internationales pour le développement de traitements et de vaccins. De telles plateformes permettraient de mutualiser les coûts et de compenser la défaillance de marché liée à la rareté des cas de hantavirus, qui peut conduire à un sous-financement de ces initiatives par les acteurs privés.

En troisième lieu, nous recommandons de poursuivre les efforts de financement des projets de recherche s'inscrivant dans l'approche *One Health*.

Replacer les maladies émergentes dans leur contexte environnemental nous paraît indispensable. D'une part, car cela permet de développer des systèmes d'alerte précoce. Par exemple, dès le début de l'année 2026, le ministère de la santé argentin avait émis une alerte en lien avec des conditions climatiques défavorables qui permettaient d'identifier des zones à risque de contamination par le hantavirus Andes. D'autre part, car cette approche permet d'éclairer les mesures de prévention à la source, notamment en matière d'aménagement du territoire et de protection de la biodiversité.

La reconnaissance institutionnelle accrue dont bénéficie l'approche *One Health* depuis la covid-19 doit désormais s'incarner par un soutien financier aux initiatives de recherche pluridisciplinaires qui la mettent en œuvre.

Enfin, une quatrième recommandation vise à encourager les efforts de pédagogie auprès du grand public, en amont comme pendant les périodes de crise, en s'appuyant sur des outils et des modalités de communication à même de susciter la confiance envers la parole

institutionnelle et scientifique, l'objectif étant de prévenir les phénomènes d'emballement médiatique.

L'Office adopte à l'unanimité les conclusions de l'audition publique sur « Hantavirus, zoonoses, science et société : quelles leçons pour l'avenir ? » et autorise la publication, sous forme de rapport, du compte rendu de l'audition et des conclusions.

La réunion s'achève à 11 h 10.

Membres présents ou excusés

Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

Réunion du jeudi 2 juillet 2026 à 9 heures

Députés

Présents. - M. Lionel Duparay, M. Jean-Luc Fugit, M. Pierre Henriët, Mme Dominique Voynet

Excusé. - M. Joël Bruneau

Sénateurs

Présents. - M. Pierre Médevielle, Mme Corinne Narassiguin, M. Stéphane Piednoir, M. Bruno Sido, M. Michaël Weber