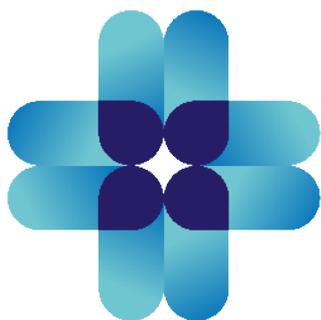


CONVENTION SCIENTIFIQUE ETUDIANTE SUR L'HYDROGENE

MARS 2024



CONVENTION
SCIENTIFIQUE
ÉTUDIANTE



SOUS LE HAUT PATRONNAGE DE

**Roland
Lescure**

Ministre délégué
Chargé de l'Industrie
et de l'Énergie



IESF

SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS ET
SCIENTIFIQUES DE FRANCE

RÉSUMÉ DU RAPPORT

Nous, jeunes étudiant-e-s scientifiques de la Convention Scientifique Étudiante sur l'hydrogène, considérons que **l'hydrogène ne doit pas être considéré comme une solution miracle**, mais comme une **technologie pertinente nécessitant d'être développée pour des usages prioritaires**, à condition de respecter les objectifs de développement durable et de sobriété.

En effet, le déploiement de la filière hydrogène doit se faire dans le respect des **Objectifs de Développement Durable**. Notamment, dans le respect des droits humains, de la justice sociale et de la préservation de la biodiversité. Pour cela, nous préconisons la mise en place d'un cadre réglementaire imposant systématiquement l'étude des impacts sociaux, environnementaux et économiques des projets liés à l'hydrogène.

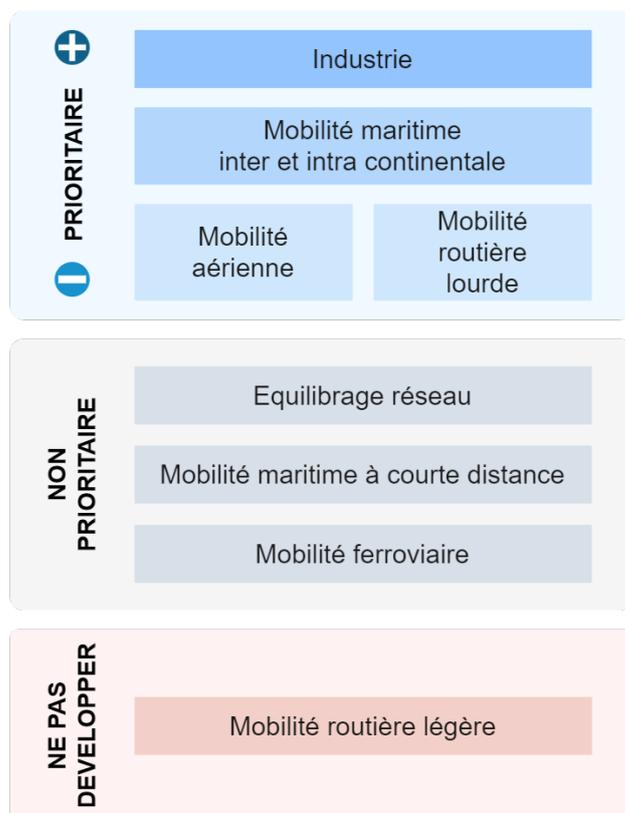
De plus, nous concluons que **la sobriété est une condition nécessaire et préalable** à l'implémentation réussie de l'hydrogène à l'échelle nationale pour décarboner les usages non-électrifiables. En effet, l'électricité étant nécessaire, à la fois pour l'électrification des usages et pour la production d'hydrogène, cette ressource sera limitante, rendant la sobriété indispensable pour assurer une transition de tous les secteurs.

La production d'hydrogène étant donc contrainte, il est nécessaire de prioriser ses usages. Nous proposons la hiérarchisation suivante :

Dans un objectif de priorisation des usages, nous préconisons l'utilisation de l'hydrogène pour les **industries lourdes**, en particulier la sidérurgie et la chimie. C'est dans ces secteurs que le pouvoir décarbonant de l'hydrogène est le plus fort, et les opportunités économiques amenées par l'hydrogène les plus intéressantes.

Ensuite, le **transport maritime inter et intra-continentale** nous apparaît comme la mobilité prioritaire pour avoir accès à l'hydrogène afin de produire des e-carburants. En effet, le transport maritime de longue distance n'est pas électrifiable alors même que le transport de marchandises bénéficie le plus grand nombre et est vital pour l'économie, ce qui nous conduit à le prioriser.

Les e-fuels sont aussi essentiels pour décarboner **le secteur aérien**. Cependant, cet usage n'est pas prioritaire par rapport au secteur maritime, car l'aviation est économiquement et socialement inégalitaire.



Hiérarchisation des usages de l'hydrogène



Les **mobilités routières lourdes** pourraient aussi avoir accès à l'hydrogène pour les trajets réguliers et de longues distances. Cela concerne cependant une petite partie du parc actuel de camions et non pas l'intégralité des véhicules, la majorité du fret routier pouvant être électrifié. Toutefois, le report modal reste la solution la plus efficace pour décarboner le secteur.

Concernant **l'équilibrage du réseau électrique**, nous préconisons de ne pas utiliser l'hydrogène pour l'équilibrage quotidien du réseau via le P2G2P, qui peut être assuré par des alternatives. Cependant, l'équilibrage réseau saisonnier par hydrogène est un sujet à approfondir.

La décarbonation du **transport maritime de courte distance** (TMCD) n'a pas besoin des solutions de carburants de synthèse envisagées pour le fret maritime longue distance. En effet, des solutions alternatives sont déployables et plus pertinentes. L'hydrogène pourrait éventuellement s'intégrer à ces solutions au travers des piles à combustible.

En matière de mobilité ferroviaire, l'utilisation de l'hydrogène se révèle pertinente pour certains cas spécifiques. Cependant, étant donné la part relativement faible du ferroviaire dans les émissions de gaz à effet de serre du secteur des transports en France, prioriser le développement de trains à hydrogène semble moins judicieux par rapport à d'autres applications. En outre, l'augmentation du trafic ferroviaire due au transfert modal encourage plutôt l'électrification de nombreuses lignes.

De plus, le prix de l'électricité étant déterminant dans le développement des usages de l'hydrogène bas-carbone, il nous paraît obligatoire une réflexion sur **les tarifications de l'électricité**. En effet, notre rapport n'aborde que partiellement les enjeux économiques et les coûts liés à l'hydrogène. Il est important de prendre en compte l'augmentation inévitable des coûts pour les politiques publiques, les industriels et les consommateurs. Toutefois, dans le cadre d'une décarbonation réussie, cette augmentation de coûts devrait être contrebalancée par la baisse des externalités négatives liées à l'utilisation des énergies fossiles.

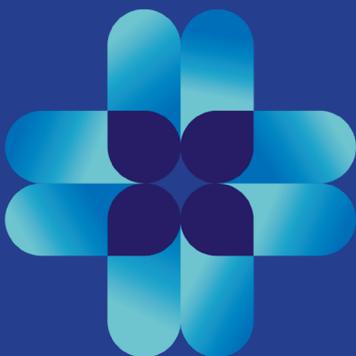
De fait, c'est seulement dans un contexte de sobriété et pour des usages ciblés que les technologies liées à l'hydrogène apparaissent pertinentes pour atteindre nos objectifs de développement durable.



RAPPORT

h

2



CONVENTION
SCIENTIFIQUE
ÉTUDIANTE



Les membres de la Convention Scientifique Étudiante sur l'hydrogène	5
Préambule	6
Nos recommandations	7
Introduction	9
La filière hydrogène	11
I. Production	16
II. Distribution	17
III. Stratégies nationales	18
Les usages	19
I. Mobilités	18
a) Mobilité ferroviaire	19
b) Mobilité maritime	20
c) Mobilité routière lourde et légère	22
d) Mobilité aérienne	24
II. Industrie	26
a) Industries qui utilisent déjà l'hydrogène, cas de l'industrie chimique	28
b) Industries présentant une opportunité de transition, cas de la sidérurgie	28
c) Industries présentant un usage incertain de l'hydrogène, cas de l'industrie cimentière	26
d) Le cas de la chaleur industrielle, englobant de nombreuses industries	29
e) Priorisation des filières industrielles	30
III. Equilibrage réseau	30
Conclusion	32
ANNEXE	35
L'organisation de la Convention Scientifique Etudiante	35
Comité de gouvernance	35
Comité des garants	36
Equipe d'animation	36
Groupe d'Appui et Fact-Checkers	36
Comité de Pilotage Opérationnel	36
Nos partenaires	37



LES MEMBRES DE LA CONVENTION SCIENTIFIQUE ETUDIANTE SUR L'HYDROGENE

Le tirage au sort n'a pas été purement aléatoire. L'équipe de pilotage a choisi une représentativité équilibrée en fonction de trois critères clés : genre (femme/homme), localité (Île-de-France/autres régions) et type de formation (Master universitaire/diplôme d'ingénieur/doctorat).

Amine Benkarroum
Noé Blévin
Louise Bomfim Magalhães
França
Arthur Bonnefoy
Géraldine Bouvier
Weize Chen
Déhélia Chettouf
Yasmine Daouia
Héloïse de Gaulmyn
Oriane Devigne
Amaury Dufour
Basile Fayard
Sylvain Febvre
Valentine Fiot Mornand
Marion Fresneau
Eva Gainette
Emmanuelle Girard

Juliette Gohin
Eric Hilolle Sagna
Henri Hunot
Sana Ibourka
Alexis lung
Romain Kremer
Khalid Lahbabi
Pauline Lang
Matthieu Le Bian
Vi Le Hanh
Benoît Libault de La
Chevasnerie
Ugo Magot
Lison Marzeliere
Gianna Milena Cardo
Céleste Mougard Champion
Matthieu Ostertag

May Ouir
Yves Pain
Dario Panicacci
Felix Praderie
Mateo Raphaël
Anna Rohart
Koumai Sali
Camille Schuster
Jérémy Tessier
Bilatou Traoré
Quentin Velard
Justin Vermaut
Antonin Violet
Justin Wilday
Antoine Williot
Louis Ziller

ECOLES ET UNIVERSITES REPRESENTEES

École AgroParisTech
École Centrale Lille
École Centrale Lyon
École CentraleSupélec
École Mines Saint-Etienne
École Mines Paris - PSL
École Mines de Nancy
École Nationale Supérieure
des Arts et Métiers
École Nationale Supérieure
d'Ingénieurs de Poitiers
École Normale Supérieure
Paris-Saclay

École Normale Supérieure
ULM
École ELISA Aerospace
École Grenoble INP Phelma
École IMT Atlantique
École IMT Nord-Europe
École INSA Centre Val de
Loire
École INSA Rennes
École Institut d'Optique
Graduate School
École ISAE-Supméca

École Supérieure d'Agro-Développement International (ISTOM)
École polytechnique universitaire de Grenoble-Alpes (Polytech Grenoble)
École d'ingénieurs Sup'EnR
Vetagro-sup Clermont Ferrand
Université CY Cergy Paris
Université de Strasbourg
Université d'Orléans
Université Paris Saclay
Universidad Nacional de Córdoba

INGENIEURS ET SCIENTIFIQUES DE FRANCE

IESF est la fédération reconnue d'utilité publique des associations d'ingénieurs et de scientifiques avec pour mission de promouvoir les cursus scientifiques, les métiers techniques, et d'être un relai auprès du grand public, en particulier des jeunes. Par ses comités sectoriels, IESF défend le progrès et met en avant des solutions pour l'industrie et l'entreprise, au service du redressement national.



La Convention Scientifique Étudiante (CSE) est une initiative lancée en 2023 par le Comité Jeunes Promotions (JP) de la fédération des Ingénieurs Et Scientifiques de France (IESF). Elle a pour but de réunir des étudiant·e·s scientifique·e·s - du master au doctorat - choisi·e·s au hasard pour représenter ce spectre de la population.

Sur le format des Conventions Citoyennes (Climat, Fin de Vie, ...), encadré·e·s par des animateur·rice·s et des garant·e·s, nous avons participé à quatre sessions de deux jours, rythmées par des conférences et des débats rassemblant expert·e·s et intervenant·e·s issu·e·s de la recherche, de l'industrie, des institutions, des ONG et du monde politique.

La question qui a été posée à la Convention est la suivante :

Dans quelle mesure et à quelles conditions les technologies liées à l'hydrogène¹ sont-elles pertinentes pour atteindre les objectifs de développement durable, dans un monde aux ressources finies ? Quels devraient être les usages prioritaires ?

Les rencontres avec des spécialistes d'horizons variés ont éclairé notre compréhension des enjeux liés à l'hydrogène et enrichi les réflexions que nous avons menées collectivement. Le résultat de cette Convention est un ensemble de recommandations, établies à l'issue de débats animés entre nous et avec nos interlocuteur·rice·s sur la production et l'utilisation de l'hydrogène. Ce rapport a été exclusivement élaboré par notre assemblée de jeunes scientifiques.

Nous nous adressons à vous, décideur·se·s publics, notamment à vous Monsieur le ministre délégué chargé de l'Industrie et de l'Énergie, qui avez placé cette Convention sous votre haut patronage. Nos recommandations visent aussi à **sensibiliser le grand public et le monde industriel aux enjeux de l'hydrogène**, sujet crucial ayant sa place au cœur du débat public.

Avant de présenter nos recommandations, nous souhaitons exposer ici les principes qui ont guidé notre réflexion :

- Nous sommes des **scientifiques** qui avons échangé avec des personnes représentant des cultures et des approches complémentaires des nôtres.
- Nous avons mené cette réflexion avec les **connaissances et données à date**, à un moment où les communautés scientifique, industrielle, économique et politique disent être en phase d'exploration de ces technologies.
- Notre engagement s'inscrit dans le cadre des **Objectifs de Développement Durable (ODD)** de l'ONU qui motivent notre réflexion.

Nous avons répondu à la question de la priorisation des usages. Ces débats nous ont également amené·e·s à nous positionner sur les **conditions de mise en place** de la filière hydrogène en France, en particulier la production d'hydrogène, la gouvernance ou la réglementation.

¹ Comme admis par la communauté scientifique, nous parlerons d'hydrogène dans l'ensemble du document, bien que c'est un abus de langage et qu'il est bien question de dihydrogène



NOS RECOMMANDATIONS

Nous récapitulons ici l'ensemble des 28 recommandations que nous avons élaborées au cours de nos travaux. Elles ont trait à la production et à l'usage de l'hydrogène dans différents secteurs.

Production

Recommandation 1 : Ne pas développer de nouvelles capacités de production d'hydrogène par vapore-formage et captation du carbone (hydrogène bleu).

Recommandation 2 : Tendre uniquement vers le développement des filières de production d'hydrogène vert et rose.

Recommandation 3 : Accélérer l'investissement dans la recherche et développement (R&D) des électrolyseurs pour améliorer les rendements et développer des technologies de rupture, plus économes en ressources (électrolyse haute température, diminution de l'empreinte matière, gestion de l'eau, etc.).

Recommandation 4 : Déployer la formation professionnelle autour de la filière hydrogène.

Recommandation 5 : Prioriser l'électrification des usages à l'utilisation d'hydrogène lorsque cela est possible.

Recommandation 6 : Favoriser l'hydrogène vert et rose dans le but de les rendre compétitifs, pour des usages prioritaires, par une action forte de l'Etat.

Distribution

Recommandation 7 : Développer la production d'hydrogène proche des lieux d'usage afin de minimiser les distances de transport.

Stratégie

Recommandation 8 : Soutenir une production locale d'hydrogène en France en développant l'ensemble de la chaîne de valeur.

Mobilité ferroviaire

Recommandation 9 : Encourager le report modal de la mobilité routière vers le ferroviaire électrique, permettant ainsi de flécher les financements alloués à l'hydrogène vers d'autres usages prioritaires.

Recommandation 10 : Ne pas accorder la priorité au développement du train à hydrogène en France.

Mobilité maritime

Recommandation 11 : Effectuer une transition vers des carburants de synthèse, à base d'hydrogène (électro-carburants, hydrogène liquide, hydrogène gazeux) pour les navires marchands.

Recommandation 12 : Affecter les différentes formes de carburants de synthèse en fonction des besoins des différents types de navires.

Recommandation 13 : Repenser le trafic maritime global dans l'optique de décarboner au maximum la filière tout en intégrant l'hydrogène dans son mix énergétique.

Mobilité routière

Recommandation 14 : Planifier, à l'échelle européenne, l'usage de l'hydrogène pour la mobilité routière lourde.

Recommandation 15 : Ne pas développer l'usage de l'hydrogène pour les véhicules légers.

Recommandation 16 : Ne développer l'hydrogène pour les poids lourds que sur les trajets de longue distance et réguliers, et pour les usages incompatibles avec l'électrification.

Recommandation 17 : La décarbonation du secteur du transport de marchandises passera nécessairement par un report modal vers le ferroviaire qui doit être encouragé par les politiques publiques.



Mobilité aérienne

Recommandation 18 : Privilégier la voie normative, plutôt que des subventions qui pourraient être fléchées sur d'autres secteurs plus socialement acceptables, pour forcer les investissements dans le développement des Sustainable Aviation Fuel² (SAF).

Recommandation 19 : Pour atteindre les objectifs de décarbonation et tenant compte de la rareté de l'hydrogène, inciter au report modal lorsqu'il existe une alternative à l'avion, en alignant les prix de l'aviation sur ceux des autres modes de transport.

Recommandation 20 : Ne pas encourager les technologies fondées sur l'utilisation directe de l'hydrogène (piles à combustible et combustion directe) pour la mobilité aérienne.

Recommandation 21 : Privilégier les e-carburants par rapport aux biocarburants dans le secteur aérien.

Industrie

Recommandation 22 : Faire de l'usage de l'hydrogène une priorité dans l'industrie à des fins de décarbonation, en excluant l'utilisation d'argent public pour la branche industrielle de raffinage en raison de son incompatibilité avec les objectifs de décarbonation.

Recommandation 23 : Remplacer en premier lieu l'hydrogène gris utilisé par les industriels par de l'hydrogène bas-carbone.

Recommandation 24 : Augmenter la capacité du réseau pour permettre le surcroît de consommation électrique industrielle tout en proposant une électricité à un prix compétitif.

Recommandation 25 : Exiger des entreprises une stratégie de décarbonation qui ne repose pas sur l'usage du Carbon Capture and Storage (CCS)³ dans le cas d'une combustion d'origine fossile.

Recommandation 26 : Envisager l'hydrogène comme vecteur de décarbonation uniquement si l'électrification des fours n'est pas possible.

Équilibrage réseau

Recommandation 27 : Ne pas utiliser le power-to-gas-to-power (P2G2P) mais privilégier le développement des STEPs⁴ ou des batteries électriques pour l'équilibrage quotidien du réseau électrique.

Recommandation 28 : Ne pas envisager l'importation d'hydrogène pour l'équilibrage du réseau électrique.



² Carburants durables d'aviation

³ Captage et stockage du dioxyde de carbone

⁴ Une STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage) est une centrale hydroélectrique de pompage-turbine. Afin d'équilibrer le réseau électrique, ces barrages spécifiques ont la possibilité d'absorber les surplus d'électricité en pompant l'eau du lac de retenue en aval.



INTRODUCTION

Dans un contexte d'alertes répétées et admises sur la scène internationale, il nous paraît important de rappeler **l'urgence dans laquelle nous nous projetons**.

Le sixième rapport du GIEC tire la sonnette d'alarme : les émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines ont réchauffé le climat à un rythme sans précédent. Ce groupe estime que la température de la surface du globe s'est élevée de 1,1 °C par rapport à la période pré-industrielle. Ce réchauffement atteindra, peu importe nos actions, 1,5 °C dès le début des années 2030. L'utilisation massive d'énergie fossile contribue grandement à ce réchauffement mondial. En France, le mix énergétique (2 544 TWh en 2022⁵), bien que moins carboné par rapport à d'autres pays industrialisés, reste émetteur net de Gaz à effet de serre (GES). La part en énergie fossile représente toujours 50 % de l'énergie consommée en 2022 dans notre pays. La limitation du réchauffement climatique ne sera possible, selon les experts du GIEC, qu'en accélérant dès maintenant la baisse des émissions de GES. Il est donc crucial pour nous, jeunes générations, de nous impliquer dans cette transition énergétique.

Par ailleurs, dans la recherche de solutions futures aux besoins énergétiques, **nous considérons qu'il est essentiel d'intégrer les objectifs de développement durable (ODD)** à la recherche d'énergies décarbonées. L'engouement actuel pour l'hydrogène nous a particulièrement interpellé-e-s par son potentiel de décarbonation. Il nous a néanmoins semblé nécessaire de réaliser une évaluation globale des impacts du développement de ce nouveau vecteur d'énergie, ainsi que sa faisabilité. Nous en dégageons une

vision systémique des atouts et points d'attentions du développement d'une filière hydrogène française.

Aujourd'hui, 95 % de l'hydrogène est consommé par le secteur industriel en France. Les trois marchés industriels les plus importants sont le raffinage de produits pétroliers (60 %), la synthèse d'ammoniac, principalement pour les engrais (25 %) et la chimie (10 %)⁶. Mais celui-ci est essentiellement issu d'une production carbonée. En effet, **seul 2 % de l'hydrogène provient d'énergies renouvelables**.

La molécule est perçue comme une promesse dans la transition énergétique mondiale, avec des stratégies ambitieuses déployées de par le monde. La Commission européenne a annoncé, en juillet 2020, un objectif de déploiement de 40 GW d'électrolyseurs d'ici à 2030, permettant une production de 10 millions de tonnes d'hydrogène.

En France, dont la stratégie vise la souveraineté énergétique, une feuille de route claire est établie, avec l'installation prévue de 6,5 GW de capacité de production bas-carbone d'ici à 2030, soutenue par un investissement de 9 milliards d'euros sur dix ans. D'autres stratégies sont adoptées par les pays voisins. L'Allemagne, par exemple, mise massivement, en plus d'une production locale (5 GW⁷), sur l'importation pour subvenir à ses besoins internes. La Chine, à titre indicatif, prévoit de produire des électrolyseurs pour l'exportation et d'investir dans la production d'hydrogène, y compris hors de son territoire.

⁵ Source : [Bilan énergétique de la France | Chiffres clés de l'énergie - Édition 2023 \(developpement-durable.gouv.fr\)](https://developpement-durable.gouv.fr/)

⁶ Source : [Plan de déploiement de l'hydrogène \(ecologie.gouv.fr\)](https://ecologie.gouv.fr/)

⁷ Source : *Revue de l'Énergie, Hors-série octobre 2021*



Pour répondre à la question qui nous a été posée, il nous a semblé primordial de considérer le contexte, à la fois **sociologique, économique, environnemental et politique** du sujet. En raison de la pluralité des enjeux, nous avons défini le cadre de notre réflexion.

Cadre de travail - Au regard de l'état actuel de la filière hydrogène, nous avons exploré les avantages et inconvénients de chacun de ses usages. Parmi les usages, seuls les plus pertinents, étudiés par la Stratégie Nationale pour le Développement de l'Hydrogène Décarboné en France et faisant déjà l'objet d'un intérêt prononcé pour la décarbonation, ont été considérés. À savoir, **l'industrie lourde**, les **mobilités routière, maritime et aérienne** ainsi que **l'équilibrage du réseau électrique**.

Ainsi, nos recommandations :

- **Ne concernent pas la mise en place technique de la filière de production de l'hydrogène ;**
- **Se veulent systémiques et ciblent l'utilisation de l'hydrogène produit ;**
- **Proposent une priorisation des usages.**

Faisant le constat que **l'hydrogène et les ressources nécessaires à sa production ne sont disponibles qu'en quantités limitées** et que, d'autre part, les intervenant·e·s rencontré·e·s témoignent de l'intérêt croissant que portent tous les secteurs économiques à cette filière, nous estimons qu'il faut anticiper cette demande future. **La priorisation des usages** de ce vecteur énergétique s'impose à notre réflexion.

Cadre géographique - Nous avons limité notre réflexion à l'échelle de **la France et de ses interactions à l'international, en particulier au sein de l'Europe**. Ainsi, les stratégies détaillées des autres pays ne sont pas étudiées, bien que les enjeux géopolitiques aient été pris en compte. Par la nature du sujet traité, il semble nécessaire de considérer les productions des

pays voisins en faisant l'hypothèse que l'hydrogène s'y développera aussi.

Cadre temporel - Nos différentes recommandations sont **à mettre en place au plus vite**, pour respecter les **objectifs de Net Zéro Carbone à horizon 2050**, en accord avec les différentes stratégies de décarbonation dans lesquelles le développement de la filière hydrogène s'inscrit.

Cadre réglementaire et stratégique - Notre réflexion tient compte de la **législation** et des ambitions **stratégiques françaises et européennes**. Nous avons formulé des pistes d'évolution de ces documents pour promouvoir le développement de certains usages de l'hydrogène aux dépens d'autres.

Cadre de responsabilité - Par ailleurs, le développement d'une filière hydrogène doit prendre en compte certains des **17 Objectifs de Développement Durable** définis et adoptés par les Nations Unies en 2015. (réf annexe : doc 17 ODD*)

Ce rapport présente nos recommandations, qui sont le fruit de notre travail collectif et d'interactions avec une grande diversité d'intervenant·e·s⁸ (Voir Annexe). Les recommandations que nous faisons sont de trois types :

- Des recommandations principales qui concernent la priorisation entre les différents usages de l'hydrogène ;
- Des recommandations spécifiques à chacun des usages de l'hydrogène ;
- Des recommandations générales sur les conditions de développement de la filière.

⁸ Source : [Présentation des principes ODD](#)



Parmi les éléments les plus abondants à la surface de la Terre, l'atome d'hydrogène est lié à d'autres types d'atomes dans l'eau, les hydrocarbures, ou la biomasse. La molécule de dihydrogène (di pour "deux fois" et "hydrogène" pour l'atome, ce qui donne le nom de la molécule) n'existant pratiquement pas à l'état pur sur Terre, la majorité de l'hydrogène doit être produite à partir de sources d'énergie primaire. Il est utilisé en tant que vecteur énergétique pour transporter l'énergie et en tant que matière première comme molécule chimique.

Une des problématiques de l'hydrogène est sa **faible densité énergétique** : il prend 4,6 fois plus de place que l'essence pour stocker une même quantité d'énergie⁹. **Un autre enjeu est la sécurité** : l'hydrogène a beau être très peu dense, les explosions sont très dangereuses.

I. Production

Actuellement, d'après l'AIE, 95 Mt d'hydrogène¹⁰ sont consommées à l'échelle mondiale, majoritairement par les industries chimiques et pétrolières. La France en consomme 1 Mt¹¹ par an et l'Europe 8 Mt. 94% de la production est effectuée à partir d'énergie fossile en France¹², un procédé très polluant puisque la production d'1 kg d'hydrogène génère plus de 10 kg de CO²e¹³ : par exemple, la production d'hydrogène en France représente aujourd'hui 3 % des émissions de GES nationales¹⁴. Outre ce procédé, il existe d'autres méthodes, plus ou moins émettrices de GES. Elles sont présentées dans le tableau ci-dessous qui présente tous les modes de production de l'hydrogène.

⁹ Source : [L'hydrogène, un vecteur d'énergie \(cea.fr\)](https://cea.fr)

¹⁰ Aux alentours de 2% de la consommation totale d'énergie mondiale.

¹¹ Source : [Global Hydrogen Review 2023 \(International Energy Agency\)](https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023)

¹² Source : [Plan de déploiement de l'hydrogène \(ecologie.gouv.fr\)](https://ecologie.gouv.fr)

¹³ L'équivalent CO² (CO²e) d'une émission de gaz à effet de serre est la quantité de dioxyde de carbone qui provoquerait le même forçage radiatif cumulé sur une période de temps donnée, c'est-à-dire qui aurait la même capacité à retenir le rayonnement solaire.

¹⁴ Source : [Plan de déploiement de l'hydrogène \(ecologie.gouv.fr\)](https://ecologie.gouv.fr)



Les couleurs de l'hydrogène



Source: Revue de l'Énergie, Hors-série octobre 2021

L'hydrogène blanc, provenant de potentielles sources naturelles d'hydrogène, n'est pas pris en compte dans notre rapport au vu de sa très faible maturité.

Si beaucoup d'industriels considèrent l'hydrogène comme un vecteur énergétique clef dans leur stratégie de décarbonation, il est nécessaire que cette molécule soit produite de façon décarbonée. C'est pourquoi la production d'hydrogène vert, rose ou bleu apparaît pertinente.

Recommandation 1 : Ne pas développer de nouvelles capacités de production d'hydrogène par vaporeformage et captation du carbone (hydrogène bleu).

Vote des élèves

Pour: 80,5%
Contre: 4,9%
Abstention: 14,6%

Cependant, la production d'hydrogène bleu ne nous permettra pas de sortir de notre dépendance aux énergies fossiles. Développer cette technologie immobiliserait des capitaux qui pourraient être alloués à la production d'hydrogène bas-carbone par électrolyse. Ainsi, le développement de nouvelles usines d'hydrogène bleu ne semble pas pertinent. **Cependant, nous considérons que les installations existantes de vaporeformage (hydrogène gris) peuvent envisager de produire de l'hydrogène bleu grâce à l'ajout de moyens de captage et de stockage de carbone (CCS) en attendant leur fin de vie.**



Recommandation 2 : Tendre uniquement vers le développement des filières de production d'hydrogène vert et rose.

Vote des élèves

Pour: 82,9%

Contre: 9,8%

Abstention: 7,3%

La production d'hydrogène vert ou rose repose sur le procédé d'électrolyse. Contrairement au vapore-formage, l'électrolyse utilise de l'électricité et de l'eau pour produire de l'hydrogène. C'est un procédé peu émetteur s'il utilise de l'électricité décarbonée, dont nous disposons en France. L'hydrogène rose s'appuie sur les centrales nucléaires et permet d'obtenir une production quasi continue d'hydrogène, ce qui correspond aux besoins en volumes constants des gros industriels. L'hydrogène vert utilise de l'électricité issue d'énergies renouvelables ; sa production est par nature intermittente et ne peut pas assurer un flux de production continu, à moins de construire plus d'installations et d'envisager des moyens de stockage importants, augmentant les coûts. L'hydrogène vert reste pertinent pour d'autres usages, comme nous le verrons plus tard. Les deux méthodes sont donc complémentaires, les usages étant différents.

Ainsi, dans la suite de notre rapport, le terme "hydrogène bas-carbone" fait référence à l'hydrogène vert et rose, l'hydrogène bleu étant exclu.

Le déploiement et la pertinence d'une filière de production d'hydrogène bas-carbone reposent néanmoins sur certaines conditions.

Recommandation 3 : Accélérer l'investissement dans la R&D des électrolyseurs pour améliorer les rendements et développer des technologies de rupture, plus économes en ressources (électrolyse haute température, diminution de l'empreinte matière, gestion de l'eau, etc.).

Vote des élèves

Pour: 97,6%

Contre: 0%

Abstention: 2,4%

Parmi les électrolyseurs, les technologies alcalines et à membrane échangeuse de protons (PEM) sont les plus matures et présentent un rendement proche de 70 %. Les électrolyseurs haute température, type SOEC¹⁵, présentent un meilleur rendement mais sont encore à un stade pré-commercial.

La France, notamment à travers le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), se distingue mondialement par sa recherche de pointe sur les technologies liées à l'hydrogène, particulièrement sur les électrolyseurs. Dans un contexte international de course aux technologies, où l'enjeu est de créer des électrolyseurs de plus en plus puissants, il nous semble crucial de continuer à maintenir cette position de pôle scientifique de référence au niveau mondial. Pour cela, investir dans la recherche et le développement est nécessaire, autant sur le plan industriel que dans les centres de recherches.

¹⁵ Solid Oxide Electrolysis Cell : Electrolyseur à oxyde solide.



Par ailleurs, la production de ces électrolyseurs nécessite des métaux rares, ce qui constitue un enjeu géopolitique, éthique et environnemental. La sécurité des approvisionnements, et des normes sociales et environnementales exigeantes concernant l'extraction, constituent un sujet majeur. Produire de futurs électrolyseurs sans matières premières rares, ou avec une quantité réduite, est un axe important pour la R&D.

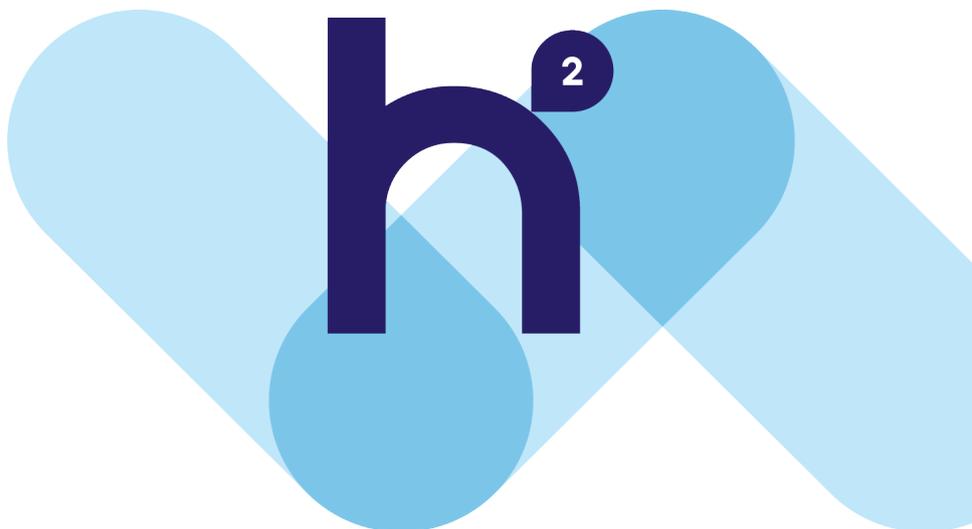
De plus, la production d'hydrogène consomme aussi de l'eau claire : obtenir 1 Mt d'hydrogène, ce qui correspond à la consommation française actuelle, nécessite 0,25 % de l'eau prélevée dans l'hexagone¹⁶. Bien qu'il y ait une tension sur la disponibilité en eau et que celle-ci continue de s'aggraver à cause du changement climatique, la production d'hydrogène ne fait pas peser une pression forte sur la ressource en France. Il s'agira néanmoins d'un point de vigilance localement, notamment dans les zones du pays en stress hydrique.

Recommandation 4 : Déployer la formation professionnelle autour de la filière hydrogène.

Vote des élèves

Pour: 95,1%
Contre: 0%
Abstention: 4,9%

La formation constitue un autre axe important concernant le développement d'une filière de production d'hydrogène en France : des formations sont requises pour assurer la cohérence entre les emplois créés et les compétences nécessaires. Cela inclut les formations initiales, mais aussi les reconversions.



¹⁶ D'après la consommation moyenne d'eau en France sur la période 2010-2020, [Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires](#)



Recommandation 5 : Prioriser l'électrification des usages à l'utilisation d'hydrogène lorsque cela est possible.

Vote des élèves

Pour: 95,1%
Contre: 0%
Abstention: 4,9%

Pour produire 1 Mt d'hydrogène, il faut environ 7 à 13 GW¹⁷ d'électrolyseurs installés. Cela nécessite environ 55 TWh d'électricité par an, soit 11 % de la production électrique française en 2023 d'après RTE. Il s'agit d'un enjeu majeur puisque la demande en électricité est par ailleurs amenée à croître dans un contexte d'électrification des usages (véhicules électriques, procédés industriels, pompes à chaleur...).

Or, dans une perspective globale de baisse des émissions, l'électrification des usages s'avère plus pertinente que la production d'hydrogène. En effet, le rendement des électrolyseurs, aux alentours de 70 %, conduit à une perte énergétique. **La priorité reste donc l'électrification des usages pour diminuer nos émissions.**

Recommandation 6 : Favoriser l'hydrogène vert et rose dans le but de les rendre compétitifs, pour des usages prioritaires, par une action forte de l'Etat.

Vote des élèves

Pour: 87,8%
Contre: 4,9%
Abstention: 7,3%

D'après les grands industriels du secteur, le coût de l'hydrogène par électrolyse se situe aux alentours de 4 à 6 € le kilo, contre 1,5 et 2,5 € le kilo pour de l'hydrogène produit par vaporeformage¹⁸ sans capture de carbone. L'industrialisation de la production des électrolyseurs permettra cependant de diminuer, de l'ordre de 2 € par kilogramme¹⁹, le coût de l'hydrogène produit par électrolyse. Ainsi, même avec une diminution des coûts des électrolyseurs, **l'hydrogène vert et rose resteront plus chers que l'hydrogène gris** : l'Etat doit favoriser l'émergence de la filière afin de le rendre compétitif pour des usages ciblés.

¹⁷ La production annuelle d'un électrolyseur alcalin d'un mégawatt dépend de son taux d'utilisation. Avec un taux de 50 %, assimilé à une fourniture en électricité renouvelable et donc intermittente, la production atteint 80 tonnes par an. Avec un taux de 90 %, par exemple avec de l'électricité nucléaire, nous atteignons 140 tonnes par an.

¹⁸ Source : [Plan de déploiement de l'hydrogène \(ecologie.gouv.fr\)](https://ecologie.gouv.fr)

¹⁹ Source : [Plan de déploiement de l'hydrogène \(ecologie.gouv.fr\)](https://ecologie.gouv.fr)



II. Distribution

Recommandation 7 : Développer la production d'hydrogène proche des lieux d'usage afin de minimiser les distances de transport.

Vote des élèves

Pour: 82,9%

Contre: 4,9%

Abstention: 12,2%



Le transport d'hydrogène par gazoduc constitue un défi. Du fait de sa petite taille, la molécule peut facilement fuir²⁰ : le réseau de transport de gaz actuel n'est pas adapté au transport d'hydrogène, sauf au prix de lourds investissements. L'autre solution de transport longue distance consiste à fabriquer un nouveau réseau de gazoducs, ce qui est encore plus onéreux et pose des enjeux d'acceptation et d'impacts sur la biodiversité. Ainsi est-il pertinent de minimiser les distances parcourues par l'hydrogène, en se concentrant sur des réseaux locaux d'échelles régionales. Le transport très longue distance, par voie maritime, constitue une option dans le cas d'importations. L'enjeu est alors de conserver l'hydrogène à l'état liquide à -253°C , ce qui est très énergivore²¹.

Les difficultés du transport de l'hydrogène soulignent la pertinence d'une production locale, permettant de réduire les distances parcourues.

²⁰ Le transport de la molécule doit être étroitement surveillé puisque le pouvoir de réchauffement global de l'hydrogène est 11 fois supérieur à celui du CO₂.

²¹ La consommation énergétique liée à la liquéfaction au maintien en température de l'hydrogène représente l'équivalent de 30 % de l'énergie transportée.



III. Stratégies nationales

Recommandation 8 : Soutenir une production locale d'hydrogène en France en développant l'ensemble de la chaîne de valeur.

Vote des élèves

Pour: 90,0%

Contre: 2,5%

Abstention: 7,5%

Dans le cadre du plan France 2030, 9 milliards d'euros sont prévus pour le développement de la filière Hydrogène au sein du pays. Cet investissement vise à développer une filière souveraine sur l'ensemble de la chaîne de valeur. La Stratégie Nationale Hydrogène prévoit ainsi 6,5 GW d'électrolyseurs installés en 2030, soit la puissance équivalente de 5 à 7 réacteurs nucléaires actuels, ce qui couvre environ les deux tiers de la consommation actuelle d'hydrogène. L'objectif est ainsi d'assurer la sécurité énergétique française en produisant localement l'hydrogène et en recourant à un minimum d'importation.

La stratégie française se différencie largement de la stratégie allemande, celle-ci reposant grandement sur les importations d'hydrogène²².

L'Union Européenne, pour sa part, veut favoriser les stratégies nationales en donnant un cadre à travers les IPCEI (Important Projects of Common European Interest), avec un objectif de 10 Mt d'hydrogène vert produit dans l'UE et 10 Mt importés en 2030, ce qui nous apparaît extrêmement ambitieux.

La stratégie française doit donc s'intégrer dans la stratégie européenne, en considérant que la France pourrait, à terme, exporter son hydrogène et/ou ses électrolyseurs auprès de ses voisins. Par ailleurs, produire de grandes quantités d'hydrogène nécessite un renforcement du réseau électrique et une augmentation des capacités de production d'électricité décarbonée.

Au regard de la consommation d'électricité, de matières premières et du coût de l'hydrogène, la production sera nécessairement limitée et ne permettra pas de satisfaire tous les besoins actuellement envisagés par les acteurs économiques pour décarboner leur filière. Ceci justifie, d'une part, la priorisation des usages, et d'autre part le recours à la sobriété pour diminuer notre consommation d'énergie. De fait, c'est seulement dans un contexte de sobriété que les technologies liées à l'hydrogène apparaissent pertinentes pour atteindre nos objectifs de développement durable.

²² Source: Communiqué de presse du Ministère fédéral de l'économie et de la protection du climat, Développement international de l'hydrogène



Nous avons identifié trois domaines potentiels de développement de la technologie hydrogène :

- Les mobilités, qu'elles soient routières, ferroviaires, maritimes ou aériennes
- L'industrie
- L'équilibrage du réseau électrique

Nous formulons nos recommandations par domaine avant de discuter des priorisations entre les différents usages en conclusion.

I. Mobilités

Nous exprimons ici quelques enjeux à prendre en considération avant de lire les recommandations concernant les mobilités, elles constituent le cadre dans lequel nous avons construit notre réflexion.

- **La sobriété** : pour parvenir aux ambitions de décarbonation nationales, la pratique de la sobriété dans les usages sera nécessaire. Cette affirmation est valide pour tous les vecteurs énergétiques, y compris l'hydrogène. Par exemple, si l'ensemble des véhicules légers fonctionnaient à hydrogène, plus de la moitié de la production électrique française actuelle²³ irait à la propulsion de ces véhicules (~260 TWh/an)²⁴. De même, si tous les véhicules légers étaient électriques, la consommation électrique associée représenterait 20 % de la production électrique française (~100 TWh/an). Au regard de l'augmentation attendue de la consommation électrique dans les différents scénarios de transitions de l'ADEME, il nous semble que la sobriété sera nécessaire pour réussir la transition énergétique.
- **Le report modal** vers des mobilités décarbonées et/ou collectives, telles que le train, le bus, le vélo et la marche, doit être au cœur de toute politique concernant les mobilités lourdes et légères des personnes. Il faut prendre en compte l'accompagnement des parties prenantes dans cette transition, afin d'y intégrer la **justice sociale** comme élément central.
- Il faut amorcer des discussions nationales sur les usages et anticiper l'adaptation des territoires vis-à-vis des surcoûts entraînés par les technologies hydrogène.
- L'hydrogène devra être **disponible** pour les secteurs qui le nécessitent : assurer le développement **sûr du transport et de la production d'hydrogène** est primordial.
- Concernant les véhicules électriques, il faut poursuivre les efforts de **R&D** afin de diminuer, par exemple, l'intensité matière de ces véhicules, et rendre son développement possible et acceptable.
- La transition vers des usages moins carbonés va nécessiter plus d'électricité : il faut donc assurer une **disponibilité** de celle-ci pour l'ensemble des secteurs.

²³ Production électrique française en 2023 : 494,3 TWh, source : RTE

²⁴ Calculs réalisés avec les données constructeurs et les chiffres du Ministère de la Transition écologique



a) Mobilité ferroviaire

Recommandation 9 : Encourager le report modal de la mobilité routière vers le ferroviaire électrique, permettant ainsi de flécher les financements alloués à l'hydrogène vers d'autres usages prioritaires.

Vote des élèves	Pour: 92,7%
	Contre: 2,4%
	Abstention: 4,9%

En France, 80 % des déplacements effectués par la SNCF sont réalisés par des trains électriques. Le ferroviaire représente moins de 0,5 % des émissions totales de GES du secteur du transport²⁵, ce qui en fait le mode de transport le moins émetteur de carbone.

Actuellement, les TER sont les trains qui émettent le plus de GES avec 401 000 tonnes de CO₂e émises par an (50% des TER sont encore équipés de traction thermique (diesel)²⁶). Afin de réduire ces émissions, il existe aujourd'hui diverses solutions : les TER au biocarburant, hybrides (carburant et électrique), à batterie et à hydrogène.

Recommandation 10 : Ne pas prioriser le développement du train à hydrogène en France.

Vote des élèves	Pour: 63,4%
	Contre: 12,2%
	Abstention: 24,4%

Pour les trains à traction électrique, le coût de l'électrification (infrastructures) est de 1 à 3 millions d'euros par km²⁷. Le coût des infrastructures associées à l'hydrogène est significatif, avec des stations nécessitant des investissements de l'ordre de 10 à 15 millions d'euros, et des centres de maintenance variant entre 500 000 et 3 millions d'euros²⁸. Cela se traduira par une augmentation des prix pour les consommateurs.

L'infographie ci-dessous présente la place potentielle du train à hydrogène dans le trafic ferroviaire. L'électrification des lignes existantes est la solution à mettre en place dès que l'intensité du trafic est suffisante. Pour les lignes moins fréquentées (moins rentables) ou pour lesquelles l'électrification n'est pas techniquement possible, la batterie doit être privilégiée. L'hydrogène trouve sa place dans cet écosystème (pour les trajets pour lesquels l'autonomie de la batterie ne sera pas suffisante), mais cette dernière est étroite. **Néanmoins, étant donné la faible part du ferroviaire dans les émissions de dioxyde de carbone dans le domaine du transport, l'apparition du train à hydrogène en France ne doit pas être priorisée.**

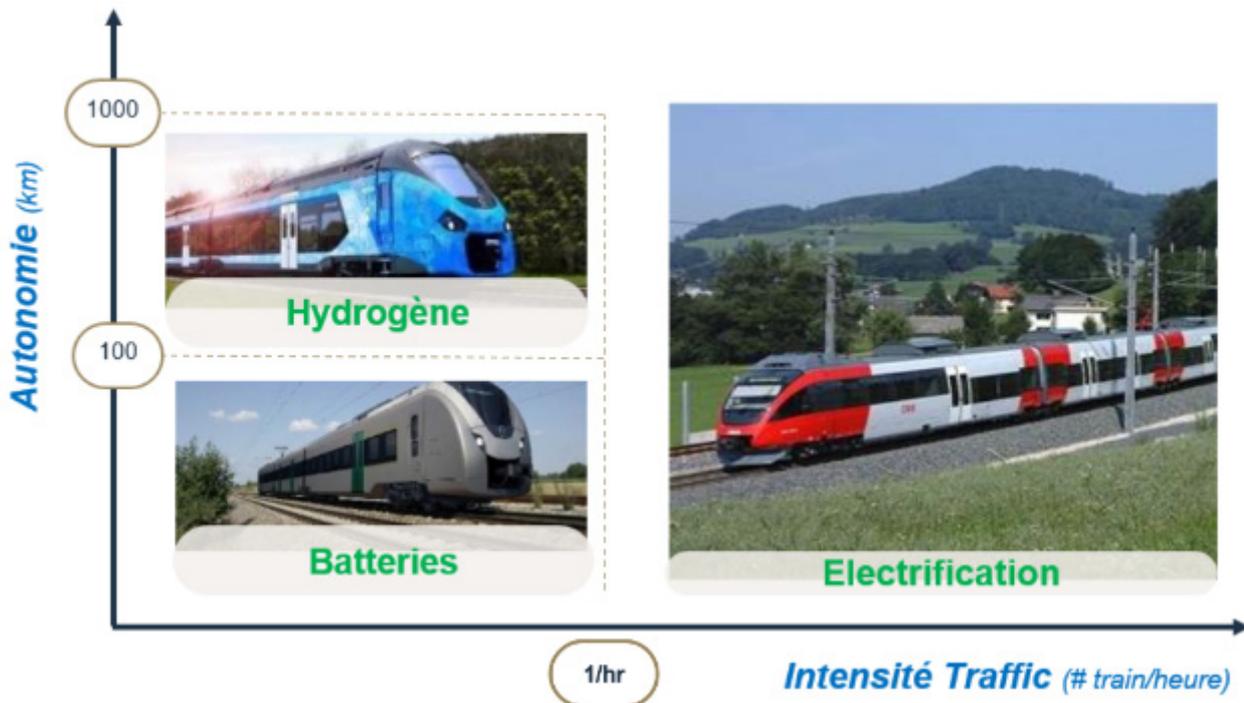
²⁵ Source : Rapport Secten 2023, Citepa

²⁶ Source : SNCF - "Quel avenir pour l'hydrogène dans le secteur ferroviaire?", Yann Harcouet

²⁷ Source : Alstom - "Hydrogen Trains", Stéphane Kaba

²⁸ Source : SNCF - "Quel avenir pour l'hydrogène dans le secteur ferroviaire?", Yann Harcouet





Source: Alstom, "Hydrogen trains", Stéphane Kaba, 01/2024

b) Mobilité maritime

Aujourd'hui, plus de 80 % du volume de marchandises mondial transite par les mers et le secteur maritime est responsable de près de 3 % des émissions de GES soit environ 1 Gt CO₂e. Ces chiffres ont augmenté de 20 % lors de la dernière décennie²⁹.

Recommandation 11 : Effectuer une transition vers des carburants de synthèse, à base d'hydrogène (e-fuels, hydrogène liquide, hydrogène gazeux) pour les navires marchands

Vote des élèves

Pour: 95,1%

Contre: 0%

Abstention: 4,9%

Il faut prioriser les efforts sur les usages les plus émetteurs, notamment pour les navires de fort tonnage (porte-conteneurs, vraquiers, tankers...). Ils représentent la majorité du trafic maritime mondial et sont responsables d'environ 75 % des émissions du secteur maritime³⁰. **Les prévisions sur l'usage de ces nouveaux carburants de synthèse annoncent une réduction d'émissions de GES entre 70 % et 100 %³¹** mais cela représentera une demande très importante dans un futur proche. Il faudra donc, dans les années à venir, développer la chaîne de valeur des e-carburants. Notons également que l'usage de l'hydrogène sous ces trois formes révèle des échelles de prix différentes : les e-carburants sont plus coûteux que l'hydrogène liquide, lui-même l'étant davantage que l'hydrogène gazeux. Ces carburants présentent des caractéristiques de stockage différentes et plus ou moins adaptées aux usages.

²⁹ Source : United Nations Conference on trade and development, Review of maritime transport, 2023

³⁰ Aujourd'hui, moins de 1% de la flotte fonctionne avec des carburants alternatifs

³¹ Source : Transport & Environment, 2021, "Decarbonizing European Shipping: Technological, Operational and Legislative Roadmap"



Recommandation 12 : Affecter les différentes formes de carburants de synthèse en fonction des besoins des différents types de navires.

Vote des élèves

Pour: 90,2%

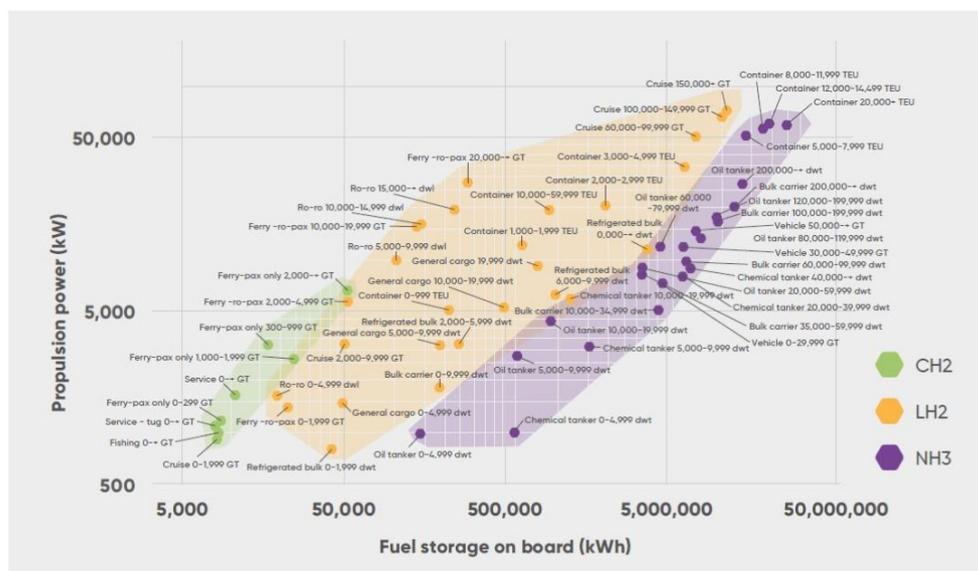
Contre: 0%

Abstention: 9,8%

En prenant en compte les dimensions économique et technique des différentes formes d'hydrogène et en les confrontant aux besoins d'autonomie énergétique des navires, certaines formes d'hydrogène apparaissent plus pertinentes que d'autres pour certains trajets :

- **E-fuels (e-methanol, e-ammoniac) pour les longs trajets (intercontinentaux)** : Les navires engagés sur de longues rotations nécessitent une très grande autonomie et seuls les e-carburants remplissent cet impératif. La densité énergétique de ces carburants les rend adaptés à cet usage. Il faut cependant noter que le surcoût par rapport à l'hydrogène liquide et gazeux sera in-fine certainement répercuté sur les consommateur-ices.
- **Hydrogène liquide pour les trajets intra-continentaux** : Pour les navires de moyenne autonomie, l'usage de l'hydrogène liquide est adapté. Il représente le meilleur compromis entre coût, densité énergétique et émissions de GES. Cependant, à date, la technologie n'est pas suffisamment mature pour être développée à grande échelle. Nous encourageons les recherches et les initiatives sur l'usage de l'hydrogène liquide comme carburant maritime.
- **Propulsion complémentaire pour les petits trajets (côtiers, trans-rade...)** : Pour le transport maritime à courte distance (TMCD³²), l'usage d'une propulsion multiple est la plus adaptée. Combiner la force du vent, les batteries électriques et l'hydrogène gazeux dans une pile à combustible permet de réduire au mieux les émissions de ce secteur³³.

On retrouve sur le graphique ci-dessous une répartition des carburants en fonction des types de navires prenant en compte la puissance nécessaire à la propulsion et les capacités de stockage à bord.



Optimum des options zéro-émissions pour différents navires (Source : Hydrogen Europe, 2020)

³² Le trafic fluvial est inclus dans le TMCD

³³ Exemple de l'Energy Observer : navire à hydrogène autonome en énergie grâce à un mix d'énergies renouvelables (solaire, éolien, hydrolien), de batteries et d'hydrogène produit à bord à partir de l'eau de mer



Recommandation 13 : Repenser le trafic maritime global dans l'optique de décarboner au maximum la filière tout en intégrant l'hydrogène dans son mix énergétique.

Vote des élèves

Pour: 95,1%

Contre: 0%

Abstention: 4,9%

Il est primordial d'effectuer une pluralité d'actions pour espérer atteindre les objectifs du GIEC et de l'accord de Paris. Bien que la transition vers les carburants de synthèses soit nécessaire pour décarboner le secteur, nous sommes convaincu·e·s qu'il faut agir en parallèle sur les aspects suivants:

- **Diminution des vitesses des navires** (accepter et normer des délais de livraison plus lents aurait un impact majeur sur la diminution des émissions de GES³⁴).
- **Optimisation logistique du trafic mondial** (méthode du Right-On-Time, meilleure gestion des rotations, diminution des temps d'attente dans les ports...).
- **Intégrer la propulsion vélique, quel que soit le type d'embarcation** (ratio investissements / gains très positif, avec une économie énergétique importante possible).
- **Optimisation technique de la flotte marchande** (forme de coque, matériaux utilisés, taille des navires...).
- **Réduction du trafic maritime mondial.**

Il est important de noter que l'Organisation Maritime Internationale (IMO) ainsi que l'Union Européenne (UE)³⁵ exigent une forte décarbonation du secteur à travers des pénalités économiques croissantes. Nos recommandations s'inscrivent donc dans celles des instances internationales.

Aussi, une telle transition s'accompagne nécessairement de chantiers majeurs dans les interfaces portuaires mondiales pour les adapter aux nouveaux besoins du secteur (nouveaux terminaux, présence de gazoducs, nouvelles normes sécuritaires, etc.). Une coopération internationale est nécessaire sur ce sujet.

c) Mobilité routière lourde et légère

La mobilité représente en France 30 % des émissions de GES, dont la moitié est imputable à la mobilité individuelle³⁶. Le nombre de véhicules particuliers en France est aujourd'hui de l'ordre de 39 millions, et cette mobilité est entrée profondément dans la culture occidentale. La France a ainsi connu une dilatation des distances, avec un mode de vie centré autour des mobilités routières, que ce soit en ville, où la majorité de la nourriture est acheminée en camion, ou à la campagne, où l'accès aux mêmes services nécessite de se déplacer en voiture individuelle.

³⁴ La consommation énergétique, et donc les émissions de GES, augmente au cube de l'augmentation de la vitesse.

³⁵ via le Carbon Intensity Index et la taxation carbone.

³⁶ Source : [Données clés | Chiffres clés du climat 2023 \(developpement-durable.gouv.fr\)](https://developpement-durable.gouv.fr)



La transition vers des modes de consommation décarbonés et responsables passera nécessairement par une modification de ces mobilités et représente un défi de taille : accepter un changement technique, donc social, sera difficile s'il n'est pas clairement expliqué.

Dans la mobilité routière lourde, nous avons considéré uniquement les camions, cars et bus et, dans la mobilité légère, les véhicules particuliers et professionnels ainsi que les taxis.

En France, 16,8 % des nouvelles immatriculations de voitures sont 100 % électriques et 9,2 % sont hybrides rechargeables en 2023³⁷ ; cependant, 97 % des véhicules en circulation au 1er janvier 2022 étaient des véhicules thermiques (essence ou diesel)³⁸.

Recommandation 14 : Planifier, à l'échelle européenne, l'usage de l'hydrogène pour la mobilité routière lourde.

Vote des élèves

Pour: 78,0%
Contre: 9,8%
Abstention: 12,2%

L'usage de l'hydrogène dans la mobilité routière lourde et légère doit être réfléchi et débattu au niveau européen et français, avec un plan cohérent qui prendra en compte les enjeux associés (sociaux, économiques, environnementaux, ...).

Recommandation 15 : Ne pas développer l'usage de l'hydrogène pour les véhicules légers.

Vote des élèves

Pour: 87,8%
Contre: 0%
Abstention: 12,2%

L'électrification permet la décarbonation des véhicules légers, dans l'hypothèse d'un système électrique décarboné. Les deux technologies (électrification ou usage de l'hydrogène) sont très différentes en termes de performances, cependant, la sûreté de la technologie hydrogène est un sujet qui doit être géré par des professionnels ; en outre, l'Analyse Cycle de Vie de la propulsion hydrogène est défavorable par rapport à l'électrique.

Recommandation 16 : Ne développer l'hydrogène pour les poids lourds que sur les trajets de longue distance et réguliers, et pour les usages incompatibles avec l'électrification.

Vote des élèves

Pour: 75,6%
Contre: 12,2%
Abstention: 12,2%

³⁷ Source : [Le marché de la voiture électrique a fini l'année 2023 pied au plancher | Les Echos](#)

³⁸ Source : [38,7 millions de voitures en circulation en France au 1er janvier 2022 | Données et études statistiques \(developpement-durable.gouv.fr\)](#)



La majorité des véhicules professionnels (bus, camions, VUL, ...) est électrifiable. Un usage des technologies hydrogène pourra éventuellement être considéré dans certains cas très spécifiques, comme le transport longue distance non ferré réguliers. En effet, la majorité des camions transportent des marchandises sur une faible distance, ce qui rend leur électrification pertinente. Le seul usage qui nous paraît compatible avec l'hydrogène est celui des camions qui font de longues distances régulièrement. Si ce développement venait à arriver, l'installation de bornes de recharge uniquement sur les grands axes routiers nous semble pertinente.

Enfin, nous considérons qu'à terme, les transports ferrés devraient remplacer l'usage des camions sur des longues distances.

✚ Recommandation 17 : La décarbonation du secteur du transport de marchandises passera nécessairement par un report modal vers le ferroviaire qui doit être encouragé par les politiques publiques.

Vote des élèves

Pour: 82,1%
Contre: 2,5%
Abstention: 15,4%

Au début du XXe siècle, le fret ferroviaire représentait 80% du fret intérieur en France. L'essor du camion à pétrole allié à une augmentation des échanges relègue le ferroviaire à 10% des flux en France au début des années 2000 - contre 88% pour le routier et 2% pour le fluvial³⁹.

En Europe, la France est en retard sur ce sujet. La part modale du ferroviaire est en moyenne 2 fois plus élevée chez nos voisins (18% en Allemagne).

La "Stratégie nationale pour le développement du fret ferroviaire" de 2021 - qui vise 25% de part modale pour le fret ferroviaire à l'horizon 2050 - reste insuffisante. La baisse du trafic routier, l'évolution de notre économie et de la demande en marchandises ne sont pas prises en compte.

Pour réduire nos émissions et pour ne pas mobiliser des capitaux visant à développer l'hydrogène dans le transport routier lourd, l'objectif est bien de réduire le trafic routier et pas seulement d'augmenter le fret ferroviaire.

Le fret ferroviaire doit être amélioré et encouragé par des investissements forts pour pouvoir concurrencer le routier.

d) Mobilité aérienne

✚ Recommandation 18 : Privilégier la voie normative, plutôt que des subventions qui pourraient être fléchées sur d'autres secteurs plus socialement acceptables, pour forcer les investissements dans le développement des SAF (Sustainable aviation fuel).

Vote des élèves

Pour: 85,4%
Contre: 2,4%
Abstention: 12,2%

³⁹ Source: SDES d'après Eurostat, DGEC, VNF



A travers les plans RefuelEU Aviation, l'Union Européenne a établi une feuille de route imposant aux États membres un taux d'incorporation minimum de SAF dans les carburants. Sans préciser les moyens à mettre en œuvre pour y arriver, chaque aéroport européen doit être capable de fournir de 2% en 2025 à 70 % en 2050 de carburants durables, dont un pourcentage minimum de 0,7 % en 2030 et 35 % en 2050 de carburants de synthèse (e-carburants).

Dans le Projet de Loi de Finance 2024, il était évoqué, pour s'aligner avec les objectifs européens, un crédit d'impôt sur les carburants comportant des taux de SAF. Nous pensons qu'il serait préférable de fixer des normes et d'interdire les carburants qui ne respectent pas ces normes. Ainsi, les objectifs seraient atteints sans coûter au contribuable et sans financer indirectement les voyages en avion qui, de manière générale, sont le fait des personnes les plus riches. De plus, cette mesure permet de donner un cap aux industriels facilitant le déploiement des investissements et de la recherche dans ce secteur.

 **Recommandation 19 : Pour atteindre les objectifs de décarbonation et tenant compte de la rareté de l'hydrogène, inciter au report modal lorsqu'il existe une alternative à l'avion, en alignant les prix de l'aviation sur ceux des autres modes de transport.**

Vote des élèves

Pour: 73,2%
Contre: 19,5%
Abstention: 7,3%

Une étude de l'ADEME indique que pour respecter les objectifs des plans européens, la production de SAF, en France en 2050, nécessiterait entre 25 et 108 TWh d'électricité suivant les scénarios envisagés⁴⁰. Ainsi, il nous semble nécessaire d'ajouter des mesures de sobriété, avec le report modal, en complément des solutions technologiques. Ce report modal pourrait être encouragé par un alignement des prix du billet d'avion sur celui des alternatives moins carbonées (le train est souvent plus cher que l'avion). Plusieurs mécanismes pourraient permettre cet alignement (subventions, taxes, laisser le marché, ...).

 **Recommandation 20 : Ne pas encourager les technologies fondées sur l'utilisation directe de l'hydrogène (piles à combustible et combustion directe) pour la mobilité aérienne.**

Vote des élèves

Pour: 78,0%
Contre: 9,8%
Abstention: 12,2%

Il ne s'agit pas d'interdire aux industriels qui ont lancé des programmes de recherche sur ces sujets de les poursuivre. Cependant, ces technologies ne sont pas matures. La pile à combustible ne peut servir que pour des vols de courte distance avec un faible nombre de passagers pour lesquels nous privilégions le report modal. La technologie à combustion directe présente quant à elle des effets non-CO₂, tels que les traînées de condensation, encore peu évalués. Nous pensons donc qu'elles ne sont pas à prioriser par rapport à d'autres technologies avec des temps de développement plus courts (efficacité énergétique, SAF).

⁴⁰ Source : [Electro-carburants en 2050 : quels besoins en électricité et CO₂ ? \(ademe.fr\)](https://www.ademe.fr/electro-carburants-en-2050-queles-besoins-en-electricite-et-co2)



Recommandation 21 : Privilégier les e-carburants par rapport aux biocarburants dans le secteur aérien.

Vote des élèves

Pour: 53,7%
Contre: 9,8%
Abstention: 36,6%

La technologie des e-fuels (carburants à base d'hydrogène et de carbone capturé) est actuellement à un stade moins avancé que les biocarburants (carburants produits à partir de biomasse). Cependant, nous considérons qu'il est important de développer la recherche dans le secteur des e-fuels car nous ne pourrions pas compter uniquement sur les biocarburants, en considérant le caractère limité de la biomasse et les tensions liées à l'usage des sols et des ressources.

II. Industrie

Les industries sont une **priorité en matière de décarbonation** en France. Elles représentent une part importante des émissions françaises de gaz à effet de serre (18 %)⁴¹ qui sont concentrées sur des sites clés : Dunkerque, Fos-sur-mer, Le Havre, vallée de la chimie à Lyon, etc. Les trois principaux secteurs industriels concernés par les émissions de gaz à effet de serre sont :

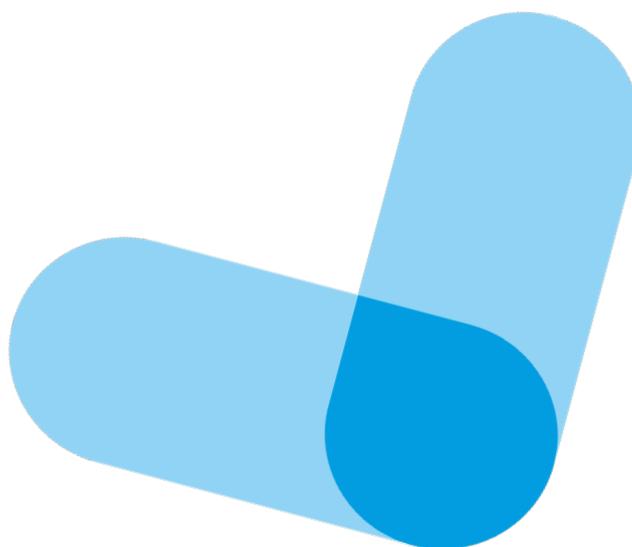
- **La sidérurgie ;**
- **L'industrie chimique incluant les engrais et le raffinage ;**
- **La cimenterie.**

L'industrie constitue un **moteur socio-économique majeur**. L'enjeu sous-jacent est alors la décarbonation de ce secteur tout en maintenant sa compétitivité.

Recommandation 22 : Prioriser l'usage de l'hydrogène dans l'industrie, à des fins de décarbonation, en excluant l'utilisation d'argent public pour la branche industrielle de raffinage du fait de son incompatibilité avec les objectifs de décarbonation.

Vote final des élèves

Pour: 87,8%
Contre: 2,4%
Abstention: 9,8%



⁴¹ Source : [Données clés | Chiffres clés du climat 2023 \(developpement-durable.gouv.fr\)](https://developpement-durable.gouv.fr/)



Couplé à l'existence de procédés décarbonés utilisant l'hydrogène bas-carbone, l'usage de ce vecteur énergétique y semble très optimal. Son implémentation dans la sidérurgie présente l'intensité décarbonante la plus forte⁴², suivie par l'industrie chimique. En l'état, **nous recommandons l'usage de l'hydrogène bas-carbone dans le secteur industriel à des fins de décarbonation**. La suite du propos aura vocation à définir sa pertinence pour chacune des activités du secteur.

Aujourd'hui, la demande en hydrogène pour le raffinage s'élève à 40 Mt/an. Produit par vaporeformage il est responsable d'environ 20% des émissions de gaz à effet de serre du secteur⁴³, l'usage de l'hydrogène bas-carbone y serait donc pertinent. Cependant, nous ne recommandons pas l'encouragement de l'usage de l'hydrogène bas-carbone via des mécanismes utilisant de l'argent public pour cette branche industrielle du fait de son incompatibilité avec les objectifs de décarbonation.

		Potentiel H ₂ bas-carbone en 2030 : borne haute (MtH ₂)	Intensité décarbonante de l'H ₂ bas-carbone (tCO ₂ e / tH ₂)	Potentiel de réduction des émissions en 2030 ¹ (MtCO ₂ e)
Industrie	Production d'ammoniac	5	12,5	60
	Production de méthanol	10	10	100
	Acier : DRI à l'H ₂	3	24	75

Source : [Carbone 4 - Etude Hydrogene](#)

Opportunités d'usage de l'hydrogène pour le secteur industriel

Certaines des activités industrielles décrites plus haut utilisent déjà l'hydrogène dans leurs procédés, comme la chimie pour la production d'engrais. D'autres industries n'utilisent pas encore l'hydrogène, mais pourraient modifier leurs procédés dépendant d'énergies fossiles pour l'utiliser lorsque celui-ci représente une alternative optimale. Cette transition est conditionnée par le développement d'une nouvelle filière de production d'hydrogène bas-carbone (cf. recommandation 6, ci-dessus).

De plus, l'usage de l'hydrogène dans l'industrie ne constitue pas un nouvel enjeu de sécurité car ce secteur est déjà confronté à l'utilisation de substances dangereuses et a déjà intégré des référentiels de sûreté nécessaires à leur manipulation.

L'utilisation de l'hydrogène bas-carbone dans l'industrie peut se répartir en 3 cas typiques illustrés par les industries chimiques, de la sidérurgie et de la cimenterie, présentés ci-dessous ici.

⁴² L'intensité décarbonante correspond au nombre de kg de CO₂e évité par kg d'hydrogène utilisé, le concept a été introduit par le cabinet Carbone 4. L'intensité décarbonante de l'hydrogène utilisé dans l'acier est de 24, contre 12,5 pour l'ammoniac et 10 pour le méthanol

⁴³ Source : Hydrogène bas-carbone : quels usages pertinents à moyen terme dans un monde décarboné ? (Carbone 4)



a) Industries qui utilisent déjà l'hydrogène, cas de l'industrie chimique

Recommandation 23 : Remplacer en priorité l'hydrogène gris utilisé par les industriels par de l'hydrogène bas-carbone.

Vote des élèves	Pour: 95,1%
	Contre: 0%
	Abstention: 4,9%

L'industrie chimique illustre ici les industries utilisant déjà de l'hydrogène (gris) dans leurs procédés. L'industrie chimique se répartit dans 2 filières : la production d'ammoniac et la production de méthanol. Elles combinent de l'hydrogène avec de l'azote pour produire de l'ammoniac (pour la fabrication d'engrais azotés) ou avec un oxyde de carbone pour la fabrication de méthanol.

Ces filières souhaitent **voir la provenance de leur hydrogène changer, pour passer à un usage d'hydrogène bas-carbone**. D'ici à 2050, les entreprises que nous avons rencontrées estiment que leur production d'ammoniac doublera pour satisfaire les nouveaux usages, notamment le transport maritime. Cependant, pour faire face à cet accroissement d'activité, **elles comptent tout de même recourir à l'hydrogène bleu ou gris pour des raisons de coûts**.

Ainsi, nous pensons qu'il est nécessaire aujourd'hui d'assurer **la compétitivité de l'hydrogène bas-carbone par rapport aux hydrogènes bleu et gris (voir recommandation n°1) et de ne pas favoriser l'hydrogène bleu car il est en contradiction avec notre recommandation n°2**.

b) Industries présentant une opportunité de transition, cas de la sidérurgie

Recommandation 24 : Augmenter la capacité du réseau électrique pour permettre le surcroît de consommation électrique industrielle tout en proposant une électricité à un prix compétitif.

Vote des élèves	Pour: 92,7%
	Contre: 0%
	Abstention: 7,3%

L'industrie de la sidérurgie illustre les industries n'utilisant pas d'hydrogène aujourd'hui mais pour lesquelles un changement de procédé basé sur celui-ci permettrait leur décarbonation.

L'industrie de la sidérurgie **changera entièrement son procédé de fabrication d'acier**, passant, d'un procédé utilisant le charbon à **un procédé utilisant de l'hydrogène et de l'électricité**. Cela permet la réduction directe du minerai de fer par adjonction d'hydrogène (ou gaz naturel) au lieu de l'utilisation d'un haut fourneau fonctionnant uniquement au charbon.

Selon les industriels du secteur, le changement de procédé **multipliera par 12 la consommation d'électricité⁴⁴** si le gaz utilisé est l'hydrogène (en comptant la production par électrolyse). À titre de comparaison, en utilisant du gaz naturel, cette multiplication sera de 3,5. L'usage de l'hydrogène bas-carbone permettrait la réduction des émissions du secteur de 90 %.

Aujourd'hui, les acteurs concernés envisagent d'utiliser du gaz naturel à court terme pour des raisons d'incertitude sur la disponibilité de l'hydrogène bas-carbone et de l'électricité à des prix compétitifs.

⁴⁴ Soit l'équivalent d'un EPR supplémentaire par usine. EPR: European Pressurized Reactor (Réacteur Pressurisé Européen)



Ainsi, nous pensons qu'il est nécessaire **d'augmenter la capacité du réseau électrique pour permettre le surcroît de consommation électrique industrielle tout en proposant une électricité à un prix compétitif.**

c) Industries présentant un usage incertain de l'hydrogène, cas de l'industrie cimentière

Les **deux tiers des émissions de gaz à effet de serre** de l'industrie du ciment sont **liées à son procédé industriel, qui rejette inévitablement du CO₂** (par clinkérisation du calcaire). Le tiers restant est lié à la consommation énergétique des fours fonctionnant au gaz naturel⁴⁵.

Bien que possible, l'usage de l'hydrogène pour l'alimentation des fours non électrifiables est débattu par les acteurs concernés pour des raisons de coût et de disponibilité. L'alternative envisagée consiste en l'utilisation de biocombustibles plutôt que des combustibles fossiles dans les fours et la réduction de l'utilisation des produits issus du procédé émetteur (réduction de l'usage de clinker).

Ces acteurs espèrent atteindre la neutralité carbone en se reposant sur des technologies de CCU/CCS. Le CO₂, issu notamment du procédé, serait alors stocké ou utilisé pour produire de l'e-méthanol.

✚ Recommandation 25 : Exiger des entreprises une stratégie de décarbonation qui ne repose pas sur l'usage du Carbone Capture and Storage⁴⁶ (CCS) dans le cas d'un procédé utilisant une combustion d'origine fossile.

	Pour: 69,7%
Vote des élèves	Contre: 6,1%
	Abstention: 24,2%

Il nous semble très pertinent de rendre l'usage de CCS moins attractif que la décarbonation d'un procédé ou que l'usage d'hydrogène produit à partir d'une électricité décarbonée. Nous pensons que **la technologie de CCS ne doit pas se substituer à une décarbonation**, en raison des paris technologiques ambitieux sur lesquels elle repose.

Le but premier étant de diminuer les émissions carbonées, nous pensons que le **cadre réglementaire relatif aux stratégies de CCS et CCU⁴⁷** doit être évolutif en fonction de la maturité technologique de ces solutions.

d) Le cas de la chaleur industrielle, englobant de nombreuses industries

✚ Recommandation 26 : Envisager l'hydrogène comme vecteur de décarbonation uniquement si l'électrification des fours n'est pas possible.

	Pour: 83,3%
Vote des élèves	Contre: 4,8%
	Abstention: 11,9%

⁴⁵ Source : [Feuille de route de décarbonation de la filière Ciment \(entreprises.gouv.fr\)](https://entreprises.gouv.fr)

⁴⁶ Captage et stockage du dioxyde de carbone

⁴⁷ CCU (Carbone Capture and Usage - captage et utilisation du dioxyde de carbone), CCS (Carbone Capture and Storage - captage et stockage du dioxyde de carbone)



La chaleur est nécessaire dans de nombreux secteurs : agroalimentaire, chimie, papèterie, verrerie, ciment... Cette chaleur est généralement obtenue à partir de carburants fossiles, notamment le charbon (65 %) et le méthane (20 %)⁴⁸. Les fours électriques ne permettent pas toujours d'atteindre des températures suffisantes ou sont trop coûteux. Les alternatives de décarbonation reposent sur l'hydrogène (seul ou combiné au méthane) ou les biocombustibles. Il nous semble important de prioriser l'électrification lorsque cela est possible, la ressource en hydrogène étant limitée.

e) Priorisation des filières industrielles

L'usage de l'hydrogène bas-carbone est prioritaire pour le secteur de l'industrie. Les exigences du domaine en matière de sécurité simplifient sa mise en œuvre par rapport à une utilisation par des particuliers. Parmi les différentes activités industrielles, l'hydrogène bas-carbone doit être prioritaire pour l'industrie chimique (ammoniac et méthanol) et pour la sidérurgie. L'industrie chimique, utilisant déjà de l'hydrogène (gris) dans son procédé, est particulièrement propice à effectuer cette transition. Quant à la sidérurgie, l'usage d'hydrogène bas-carbone présente une intensité décarbonante importante justifiant cette transition.

III. Equilibrage réseau

Le réseau électrique comprend la production, le transport, la distribution et la régulation de l'électricité. La production en électricité doit être égale à la consommation à tout instant. Deux temporalités sont à prendre en compte : quotidienne et saisonnière. Actuellement, l'hydrogène n'est pas utilisé pour équilibrer le réseau électrique français.

En revanche, l'hydrogène peut avoir un rôle à jouer dans l'équilibrage du réseau électrique. En effet, il peut être utilisé comme tampon pour pallier l'intermittence des énergies renouvelables. Lors des pics de production dus aux énergies renouvelables, la quantité d'électricité produite est supérieure à la demande. Le surplus d'électricité est ainsi transformé grâce au Power To Gas (P2G) qui permet de transformer le surplus d'électricité en hydrogène grâce à des électrolyseurs. Son rendement est situé autour de 70 %.

Le P2G2P (Power to gas to power) est un processus P2G suivi d'un stockage de l'hydrogène en cavité saline, puis d'une reconversion de l'hydrogène en électricité (processus inverse dénommé G2P : Gas to Power) grâce à une pile à combustible. Le rendement du P2G2P est faible au regard d'autres moyens de conversion d'énergie, de l'ordre de ~ 30 %⁴⁹.

Nous manquons de données et de visibilité sur l'avenir du réseau électrique français pour conclure quant à la composition future du mix électrique. Par conséquent, nous introduisons par la suite des pistes de réflexion, lorsque nous ne pouvons pas nous prononcer avec assurance sur des recommandations. Nous avons, cependant, deux certitudes que nous traduisons en recommandations.

⁴⁸ Source : *The Shift Project*

⁴⁹ Le rendement du P2G est d'environ 70 %, celui de la pile à combustible est d'environ 50%. Le stockage induit aussi quelques pertes. Le rendement final du P2G2P est donc de l'ordre de 30 %. A titre de comparaison, les barrages hydroélectriques ont un rendement d'environ 80 %.



Recommandation 27 : Ne pas utiliser le P2G2P mais privilégier le développement des STEPs⁵⁰ ou des batteries électriques pour l'équilibrage quotidien du réseau électrique.

Vote des élèves

Pour: 56,1%
Contre: 19,5%
Abstention: 24,4%

Le rendement du P2G2P est faible et demande de nouvelles installations et de nouveaux raccordements au réseau électrique. Le stockage quotidien est assuré par des alternatives comme les STEPs déjà existantes ou des batteries. En outre, en considérant un mix énergétique électrique avec moins de 75 % d'EnR et une part relativement importante de nucléaire, comme prévu par la plupart des scénarios de l'ADEME⁵¹, le P2G2P quotidien ne sera pas justifié. Le faible surplus d'électricité journalier ne permettra pas de produire une quantité suffisante d'hydrogène pour pallier l'intermittence des EnR au regard des pics de consommation quotidiens. L'hydrogène serait plus adapté pour répondre à des besoins saisonniers, particulièrement aux pics de consommation hivernaux.

Piste de réflexion : Le P2G2P pourrait être utilisé comme un moyen de stockage saisonnier pour pallier les pics de consommation hivernaux pour lesquels les batteries et les STEP ne sont pas toujours adaptés.

L'hydrogène est produit avec de l'électricité à bas coût car il s'agit d'électricité en surplus lorsque la production est plus élevée que la demande. Cet hydrogène peut être converti en électricité lors des pics de consommation (P2G2P), lorsque le prix de l'électricité est le plus haut. Le faible volume d'hydrogène, la faible vitesse de remplissage du réservoir ainsi que l'irrégularité de la production **ne permettrait pas d'envisager l'utilisation stable de cet hydrogène pour d'autres usages (industriels, transport...)**, ce qui pourrait le valoriser pour un équilibrage saisonnier du réseau électrique.

Recommandation 28 : Ne pas envisager l'importation d'hydrogène pour l'équilibrage du réseau électrique.

Vote des élèves

Pour: 82,9%
Contre: 17,1%
Abstention: 0%

Le mix électrique français, peu carboné grâce au nucléaire, permet déjà la production d'un hydrogène bas-carbone. De plus, la France s'oriente vers une souveraineté vis-à-vis de la production de l'hydrogène. L'intérêt de l'import est donc limité pour l'équilibrage du réseau électrique.

⁵⁰ Une STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage) est une centrale hydroélectrique de pompage-turbinage. Afin d'équilibrer le réseau électrique, ces barrages spécifiques ont la possibilité d'absorber les surplus d'électricité en pompant l'eau du lac de retenue en aval.

⁵¹ Rapport "Transition(s) 2050" de l'ADEME.



CONCLUSION

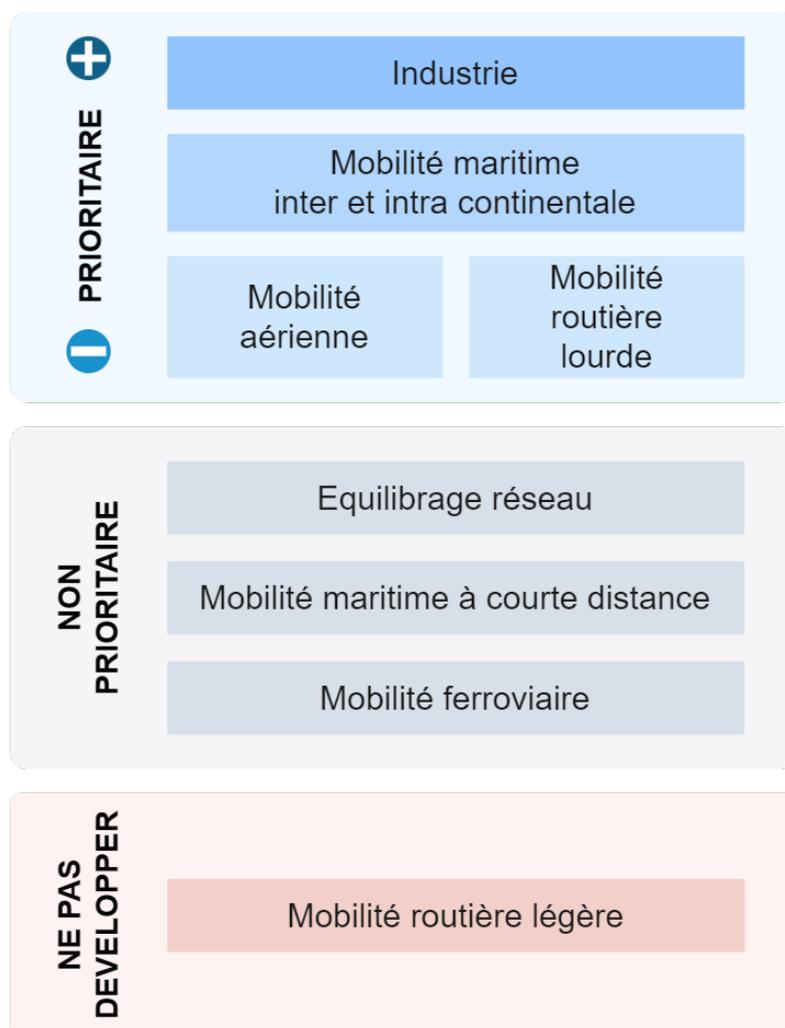
Nous, jeunes étudiant-e-s scientifiques de la Convention Scientifique Étudiante sur l'hydrogène, considérons que **l'hydrogène n'est pas une solution miracle**, mais une technologie pertinente nécessitant d'être développée pour des usages prioritaires, à condition de respecter les objectifs de développement durable et de sobriété.

En effet, le déploiement de la filière hydrogène doit respecter les **Objectifs de Développement Durable** notamment : les droits humains, la justice sociale et la préservation de la biodiversité. Pour cela, nous préconisons la mise en place d'un cadre réglementaire imposant systématiquement l'étude des impacts sociaux, environnementaux et économiques des projets liés à l'hydrogène.

De plus, nous concluons que la **sobriété est une condition nécessaire et préalable** à l'implémentation réussie de l'hydrogène à l'échelle nationale pour décarboner les usages non-électrifiables. En effet, l'électricité étant nécessaire à la fois pour l'électrification des usages et pour la production d'hydrogène, cette ressource sera limitante, rendant la sobriété indispensable pour assurer une transition de tous les secteurs.

La production d'hydrogène étant contrainte, il est nécessaire de prioriser ses usages. Nous proposons la hiérarchisation suivante :

Hiérarchisation des usages



Dans un objectif de priorisation des usages, nous préconisons l'utilisation de l'hydrogène d'abord pour les **industries lourdes**, en particulier la sidérurgie et la chimie. C'est dans ces secteurs que le pouvoir décarbonant de l'hydrogène est le plus fort, et les opportunités économiques amenées par l'hydrogène les plus intéressantes.

Ensuite, le **transport maritime inter et intra-continental** nous apparaît comme la mobilité dont l'accès à l'hydrogène est prioritaire afin de produire des e-carburants. En effet, le transport maritime de longue distance n'est pas électrifiable alors même que le transport de marchandises bénéficie le plus grand nombre et est vital pour l'économie, ce qui nous conduit à le prioriser.

Les e-fuels sont aussi essentiels pour décarboner le secteur aérien. Cependant, cet usage n'est pas prioritaire par rapport au secteur maritime, car **l'aviation** est économiquement et socialement inégalitaire.

Les **mobilités routières lourdes** pourraient aussi avoir accès à l'hydrogène pour les trajets réguliers et de longues distances. Cela concerne cependant une petite partie du parc actuel de camions et non pas l'intégralité des véhicules, la majorité du fret routier pouvant être électrifié. Toutefois, le report modal reste la solution la plus efficace pour décarboner le secteur.

Concernant **l'équilibrage du réseau électrique**, nous préconisons de ne pas utiliser l'hydrogène pour l'équilibrage quotidien du réseau via le power-to-gas-to-power (P2G2P), qui peut être assuré par des alternatives. Cependant, l'équilibrage réseau saisonnier par hydrogène est un sujet à approfondir.

La décarbonation du **transport maritime de courte distance (TMCD)** n'a pas besoin des solutions de carburants de synthèse envisagées pour le fret maritime longue distance. En effet, des solutions alternatives sont déployables et plus pertinentes. L'hydrogène pourrait éventuellement s'intégrer à ces solutions au travers des piles à combustible.

En matière de **mobilité ferroviaire**, l'utilisation de l'hydrogène se révèle pertinente pour certains cas spécifiques. Cependant, étant donné la part relativement faible du ferroviaire dans les émissions de gaz à effet de serre du secteur des transports en France, prioriser le développement de trains à hydrogène semble moins judicieux par rapport à d'autres applications. En outre, l'augmentation du trafic ferroviaire due au report modal encourage plutôt l'électrification de nombreuses lignes.

Enfin, nous recommandons de ne pas favoriser le développement de l'hydrogène pour la **mobilité routière légère**. En effet, les véhicules à batteries sont plus adaptés en termes d'efficacité énergétique et d'impact environnemental sur l'ensemble du cycle de vie du véhicule, tout en offrant une autonomie satisfaisante.

Nous mettons en garde contre un soutien inconditionnel à l'hydrogène bas-carbone, malgré son potentiel pour atteindre les objectifs climatiques. Son expansion incontrôlée peut aggraver la crise environnementale, notamment par la surexploitation de ressources critiques comme l'eau et les métaux rares, et par les impacts socio-environnementaux de l'exploitation minière, nécessaires tant pour cette technologie que pour l'électrification par batteries.

Par ailleurs, le développement de l'hydrogène dépend étroitement de la progression des infrastructures et du réseau électrique. Que ce soit pour répondre aux nouveaux besoins en électricité et en hydrogène de l'industrie lourde ou pour répondre à la demande grandissante liée aux mobilités électriques, une tension sans précédent pèsera sur la demande en électricité. Ainsi, anticiper sur le long terme **le dimensionnement du réseau électrique et les raccordements** aux différents usages est un enjeu majeur de la mise en place de l'hydrogène.

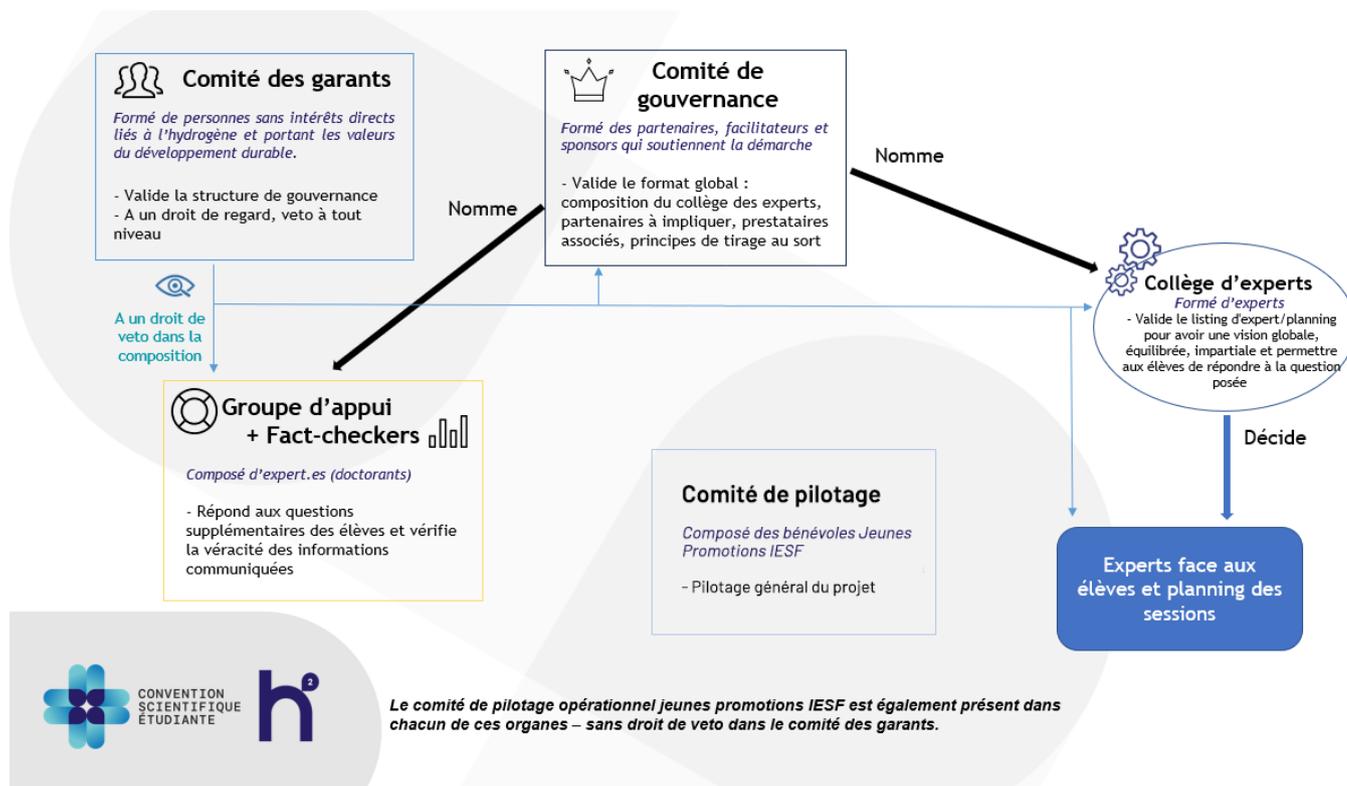
De plus, le prix de l'électricité étant déterminant dans le développement des usages de l'hydrogène bas-carbone, il nous paraît obligatoire de conduire une réflexion sur **les tarifications de l'électricité**. En effet, notre rapport n'aborde que partiellement les enjeux économiques et les coûts liés à l'hydrogène. Il est important de prendre en compte l'augmentation inévitable des coûts pour les politiques publiques, les industriels et les consommateurs. Toutefois, dans le cadre d'une décarbonation réussie, cette augmentation des coûts devrait être contrebalancée par la baisse des externalités négatives liées à l'utilisation des énergies fossiles.

C'est uniquement dans un contexte de sobriété et pour des usages ciblés que les technologies liées à l'hydrogène apparaissent pertinentes pour atteindre nos objectifs de développement durable.



ANNEXE

L'organisation de la Convention Scientifique Etudiante



Comité de gouvernance

Réuni 3 fois

Formé de nos précieux partenaires, facilitateurs et sponsors, ce comité soutient activement notre démarche. Il valide le format global du projet, y compris la composition du collège des experts, les partenaires à impliquer, les prestataires associés et les principes de tirage au sort.

- **Jane Lecomte**, conseillère Transition Ecologique auprès de la Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
- **Sylvianne Villaudière**, vice-présidente de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale (SEIN)
- **Stéphane Gorce**, partner chez Eurogroup Consulting
- **Cédric Prunier**, directeur délégué stratégie, directeur du développement, partenariats, entrepreneuriat et valorisation de l'école Mines Paris
- **Jean Paul Reich**, consultant-conférencier et conseil EnerHy

Collège d'Experts

Réuni 5 fois

Composé d'experts éminents, ce collège valida le listing d'experts/planning pour assurer une vision holistique, équilibrée et impartiale. Il décida des experts qui ont interagi avec les étudiants et il a établi le planning des sessions.

- **Luc Bodineau**, Coordinateur du Programme Hydrogène de l'ADEME
- **Sophie Szopa**, vice-président en charge de développement soutenable de l'université Paris Saclay et rédactrice du rapport du groupe 1 chapitre 6 du GIEC



- **Valérie Bouillon-Delporte**, *co-présidente France Hydrogène*
- **Abdelilah Slaoui**, *directeur adjoint scientifique, responsable de la cellule Énergie du CNRS et co-directeur du PEPR Hydrogène*
- **Nadège Troussier**, *directrice générale adjointe en charge des formations à l'ENSAM*
- **Joao Peirera Da Fonseca**, *chargé de projets chez CDC Biodiversité*

Comité des garants

Composé de personnes sans intérêt direct lié à l'hydrogène, ce comité porta les valeurs du développement durable. Il avait le pouvoir de valider la structure de gouvernance et exerça un droit de regard et un veto à tous les niveaux.

- **Mathieu Sanchez**, *ancien participant de la Convention Citoyenne pour le Climat, membre du comité de gouvernance de la Convention Citoyenne sur la Fin de Vie et garant de la Convention Citoyenne d'Est ensemble*
- **Caroline Véran**, *fondatrice et directrice de l'agence RSE Croissance Bleue*
- **Philippe Quirion**, *directeur de recherche CNRS au CIRED*

Equipe d'animation

Pendant toute la durée des travaux, les membres ont été accompagnés par des professionnels de l'ingénierie et de l'animation du dialogue citoyen : Res publica et Eurogroup Consulting. Ce sont 4 professionnels qui ont animé l'ensemble des travaux en présentiel ou à distance. L'animation a été conduite en suivant des protocoles mis au point préalablement par les animateurs et le Comité de gouvernance de la Convention.

- **Sophie Guillain et Gilles Laurent Reyssac** (*Res publica*)
- **Margaux Boulanger et Thomas Cazin** (*Eurogroup Consulting*)

Groupe d'Appui et Fact-Checkers

Regroupant des expert.e.s, en l'occurrence des doctorant.e.s, ce groupe a répondu aux questions supplémentaires des étudiants et veilla à la véracité des informations communiquées.

- **Myriam Badri, Sebastian Vallejo Jimenez, Thomas Lapi, René Bankati**
- **Michel Colombier**, *co-fondateur et directeur scientifique de l'Institut du développement durable et des relations internationales*

Comité de Pilotage Opérationnel

Composé des bénévoles des Jeunes Promotions d'IESF, ce comité assura le pilotage général du projet. Il était également présent dans chacun des organes, sans droit de veto dans le comité des garants.

Mélie Marrin Lamelet, Amaury Fievez, Cassandre Pradon, Arthur Stainmesse, Meryem Ben Dhiaf, Komla Adjabli, Mélanie Schiffer, Jean Vieville, Pauline Lefebvre, Benjamin Saudreau, Matteo Giordano, Aurélien Guez



NOS PARTENAIRES



MINISTÈRE CHARGÉ DE L'INDUSTRIE

Liberté
Égalité
Fraternité

La convention scientifique étudiante est placée sous le haut patronage de Roland Lescure, ministre délégué à l'industrie et à l'énergie.



L'ADEME participe à la construction des politiques nationales et locales de transition écologique. Pour cela, nous nous appuyons sur nos équipes, présentes sur tout le territoire français, et sur un budget dédié à nos moyens d'intervention. Nos missions, notre organisation et notre fonctionnement sont fixés par le Code de l'environnement. Engagée depuis 30 ans dans la lutte contre le changement climatique et la dégradation des ressources, nous sommes résolus à faire bouger les lignes.



Fondé en 1923, le Conseil Français de l'Énergie est le comité national représentant la France auprès du Conseil Mondial de l'Énergie (World Energy Council), organe agréé par les Nations Unies, qui rassemble plus de 3 000 organisations publiques et privées et représente près d'une centaine de pays. Association à but non lucratif reconnue d'utilité publique, le Conseil Français de l'Énergie a pour objectif de promouvoir la fourniture et l'utilisation durables de l'énergie pour le plus grand bien de tous.



L'Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture est une institution spécialisée internationale de l'Organisation des Nations unies, créée le 16 novembre 1945 à la suite des dégâts et des massacres de la Seconde Guerre mondiale. La Journée mondiale de l'ingénierie pour le développement durable est l'une des journées internationales de l'UNESCO et est célébrée chaque 4 mars. Il a été proclamé par la Conférence générale de l'UNESCO le 25 novembre 2019, sur la base d'une proposition de la Fédération mondiale des organisations d'ingénieurs.

**Société
d'Encouragement
pour l'industrie
nationale** FONDÉE EN 1801

La Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale est une société savante fondée en 1801, pour relancer l'économie de la France. Au XIXe siècle, elle a apporté une contribution directe au développement économique de la France. Elle a été reconnue d'utilité publique dès 1824 et poursuit sa mission d'accompagnement des grandes mutations industrielles, économiques et sociales. Elle vise à stimuler la renaissance industrielle française, à favoriser l'innovation technologique et à valoriser l'entrepreneuriat.





Empowering a sustainable world

Elogen est le leader français de l'électrolyse PEM (membrane échangeuse de protons), spécialisé dans la conception et l'assemblage d'électrolyseurs destinés à la production de l'hydrogène vert. Animée par le goût de l'innovation et un savoir-faire technologique de pointe, l'entreprise sert, en France et à l'international, les marchés de l'industrie et de l'énergie.



Opérateur majeur de transport de gaz à haute pression, GRTgaz assure une mission de service public visant à garantir la continuité d'acheminement du gaz et s'engage résolument en faveur de la neutralité carbone, du développement des gaz renouvelables et de la transition énergétique dans les territoires.



Nous sommes un groupe mondial de référence dans l'énergie bas carbone et les services. Avec nos 96 000 collaborateurs, nos clients, nos partenaires et nos parties prenantes, nous sommes engagés chaque jour pour accélérer la transition vers un monde neutre en carbone, grâce à des solutions plus sobres en énergie et plus respectueuses de l'environnement. Guidés par notre raison d'être, nous concilions performance économique et impact positif sur les personnes et la planète en nous appuyant sur nos métiers clés (gaz, énergies renouvelables, services) pour proposer des solutions compétitives à nos clients.



HY2GEN
FRANCE SAS

Hy2gen France SAS a été créée en 2019 à Aix en Provence. Son objet social est de développer et produire de l'hydrogène renouvelable, du bio méthanol et des carburants renouvelables pour les marchés régionaux et européens.



EY fournit des services de conseil, d'assurance, de fiscalité et de transaction qui aident à résoudre les défis les plus difficiles de nos clients et à construire un monde du travail meilleur pour tous.



Fives est un leader mondial de l'ingénierie industrielle (près de 9 000 collaborateurs dans 25 pays), offrant des solutions innovantes et durables dans de nombreux secteurs comme : l'acier, l'aluminium, l'aéronautique, l'automobile, la logistique, l'énergie, etc.



ENERCAT est une PME française active dans le domaine du traitement des rejets gazeux industriels. Spécialisée dans l'abattement des rejets azotés, elle est une référence auprès des industriels de la Chimie, de l'Incinération et des Producteurs d'Engrais. Depuis 2022, ENERCAT a lancé un programme de recherches ambitieux sur la vectorisation de l'hydrogène vert à partir d'ammoniac et a développé une solution unique brevetée qu'elle entend introduire sur le marché en 2026.





Eurogroup Consulting est un cabinet de conseil français, spécialisé en organisation, stratégie et management, pour les secteurs privé et public. Leur mission : transformation et mobilisation vers des résultats durables, pour une économie et une société plus responsable.



Cabinet de conseil en concertation et dialogue collaboratif, Res publica aide les institutions, les organisations et les entreprises à organiser des dialogues utiles et efficaces. Res publica promeut la société du dialogue, dans laquelle les personnes et les acteurs échangent et pensent ensemble un avenir souhaitable.



La Fondation Arts et Métiers a pour objet de faciliter l'accès à la culture scientifique et technologique, favoriser la recherche et l'enseignement en ces domaines, promouvoir l'action de l'ingénieur dans les activités économiques et contribuer au travail de mémoire des techniques et industries.



Fondée en 1846, la Société des ingénieurs Arts et Métiers représente 62.000 Ingénieurs « Gadzarts » dont 35.000 membres, diplômés de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM). Sa vision est de devenir une force d'influence incontournable de la transformation environnementale, sociétale, industrielle et numérique en France tout en contribuant à l'épanouissement professionnel et personnel tout au long de la vie. Elle partage également une identité commune avec l'École et l'Union des élèves Arts et Métiers, ce qui la rend unique : «Leaders des industries responsables».



Fondation
MINES PARIS

La fondation Mines Paris, reconnue d'utilité publique, a pour mission de partager et de soutenir les ambitions de l'École des Mines de Paris. Quatre valeurs conduisent nos actions de soutien envers l'École : excellence, engagement, égalité des chances, transparence.



MINES PARIS

Mines Paris – PSL forme, depuis sa création en 1783, des ingénieurs de très haut niveau capables de résoudre des problèmes complexes dans des champs très variés. Première école en France par son volume de recherche contractuelle, Mines Paris – PSL a une importante activité de recherche orientée notamment vers l'industrie, mais ses travaux s'étendent de l'énergétique aux matériaux, en passant par les mathématiques appliquées, les géosciences et les sciences économiques et sociales.



CentraleSupélec Alumni rassemble la communauté des étudiants, étudiantes et diplômés de CentraleSupélec, Supélec et Centrale Paris. Elle propose à ses membres des parcours d'accompagnement sur leur projet professionnel, des conférences et activités tout au long de leur vie.



AgroParisTech Alumni



AgroParisTech Alumni est une communauté active et influente constituée de 25 000 diplômés d'AgroParisTech. Nous accompagnons chaque Alumni tout au long de sa vie selon ses besoins, dans son regard sur le monde, et son action au quotidien, car nous croyons plus que jamais que les compétences Agros sont précieuses dans le monde d'aujourd'hui, et de demain.

L'AX ou l'Association des anciens élèves et diplômés de l'École polytechnique s'est portée comme missions de créer et entretenir des liens entre élèves et alumni de l'X, venir en aide aux camarades en difficulté et accompagner ses membres tout au long de leur carrière.



Le Centre interdisciplinaire Energy4Climate (E4C) lancé en juin 2019 par l'Institut Polytechnique de Paris et l'École des Ponts ParisTech s'implique dans la transition énergétique, par le biais de la recherche, de la formation et de l'innovation. Les activités du centre sont développées par ses chercheurs en lien avec des acteurs industriels. Elles associent les sciences sociales et économiques, les sciences des matériaux et l'ingénierie, les mathématiques appliquées, l'informatique ou encore la géophysique



S'appuyant sur une recherche intensive de haut niveau, Centrale Lyon forme des assistants-ingénieurs, ingénieurs et scientifiques à travers un continuum de formation du post-bac au doctorat et les accompagne tout au long de leur carrière professionnelle. La pédagogie allie sciences fondamentales, sciences de l'ingénieur et sciences économiques, humaines et sociales et repose sur théorie, activités expérimentales et mise en situation professionnelle.

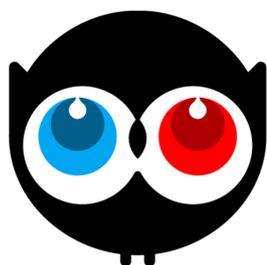


Le BNEI, Bureau National des Élèves Ingénieurs, association loi 1901, est l'unique organisation représentant les élèves-ingénieurs. Elle est administrée et animée par des élèves-ingénieurs, bénévoles. Le BNEI représente l'ensemble des 185 000 élèves-ingénieurs en fédérant les Bureaux des Elèves des écoles et les élus

bpifrance



Bpifrance finance et accompagne les entreprises - à chaque étape de leur développement - en crédit, en garantie, en aide à l'innovation et en fonds propres. Ce faisant, Bpifrance agit en appui des politiques publiques conduites par l'Etat et les Régions. La french Fab, lancée le 2 octobre 2017, incarne les entreprises, acteurs économiques, institutions et sites industriels situés en France qui se reconnaissent dans la volonté de développer l'industrie française.



Ulule accompagne celles et ceux qui ont les idées larges et qui veulent faire bouger les choses. Depuis 2010, nous facilitons le passage à l'action et le développement de projets créatifs et durables.

