

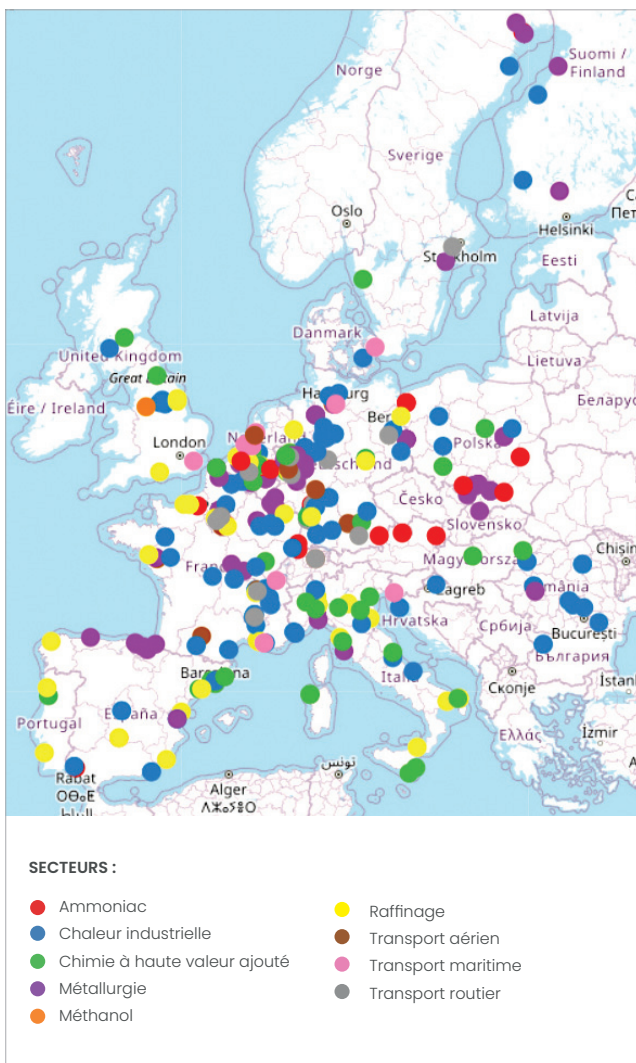


—

**ÉTUDE SISYPHE :  
DYNAMIQUE  
DE LA DEMANDE  
EUROPÉENNE  
EN HYDROGÈNE  
BAS CARBONE  
D'ICI 2040**

# LES MESSAGES-CLÉS DE L'ÉTUDE

Le plan européen REPowerEU, proposé par la Commission européenne en 2022 fixe un objectif ambitieux de consommation de 20 millions de tonnes par an d'hydrogène renouvelable à l'horizon 2030 en Europe, dont la moitié produite sur le sol européen. À titre de comparaison, 9 millions de tonnes d'hydrogène (pour l'essentiel d'origine fossile) sont consommées aujourd'hui au niveau européen, principalement par les secteurs industriels du raffinage et de la chimie. Le CEA, avec l'étude SISYPHE, s'intéresse à la dynamique de la demande européenne en hydrogène électrolytique bas carbone d'ici 2040.



## 1 | AUJOURD'HUI, UN DÉCALAGE ENTRE LES OBJECTIFS EUROPÉENS ET LA DEMANDE PROJÉTÉE

L'étude SISYPHE montre un écart notable entre l'objectif européen et la projection de la demande en hydrogène bas carbone de l'Europe d'ici 2040. Cette projection se base sur la réalité des projets engagés et sur la vision de quelques 70 industriels européens interrogés sur leurs besoins potentiels en hydrogène.

La demande en hydrogène électrolytique projetée par l'étude est ainsi de 2,5 millions de tonnes en 2030 et de 9 millions de tonnes en 2040. Cela montre un risque fort de ne pas atteindre les objectifs fixés au niveau européen, même si les incertitudes sous-tendant les projections sont nombreuses.

L'étude met en lumière des dynamiques très différentes entre les secteurs potentiels consommateurs d'hydrogène. En l'état, ceux de la sidérurgie et du transport aérien seraient les plus demandeurs en hydrogène électrolytique sur la période 2030-2040.

### UNE ÉTUDE BASÉE SUR UN LARGE PANEL D'ACTEURS

L'étude SISYPHE s'appuie sur un panel d'acteurs répartis sur toute l'Europe, qui sont des consommateurs actuels d'hydrogène ou bien amenés à le devenir.



**Atelier EHT.** Vue de la salle blanche dédiée à la préparation et l'impression des cellules EHT.

## 2 | L'INCERTITUDE D'ACCÈS À UNE ÉLECTRICITÉ BON MARCHÉ ENTRE 2030 ET 2040

Les consommations annuelles européennes en électricité bas carbone pour produire par voie électrolytique les quantités d'hydrogène estimées par l'étude en 2030 et 2040 sont respectivement de 120 TWh et 420 TWh. À titre de comparaison, la consommation en électricité de la France est aujourd'hui de 400 TWh.

**L'engagement des industriels dans l'usage de l'hydrogène électrolytique pourrait être freiné par un coût de l'électricité bas carbone élevé en Europe, ne permettant de produire l'hydrogène à un coût compétitif.**

## 3 | DES QUESTIONNEMENTS SUR LA DISPONIBILITÉ DES ÉLECTROLYSEURS

Le scénario SISYPHE implique d'installer au minimum 3 à 5 GW d'électrolyseurs chaque année à compter de 2028, sous condition d'accès à une électricité peu carbonée durant un grand nombre d'heures dans l'année. À défaut, il faudrait installer des capacités d'électrolyse encore plus importantes, ce qui pose la question de **la disponibilité d'électrolyseurs de grande puissance dès la fin de la décennie.**

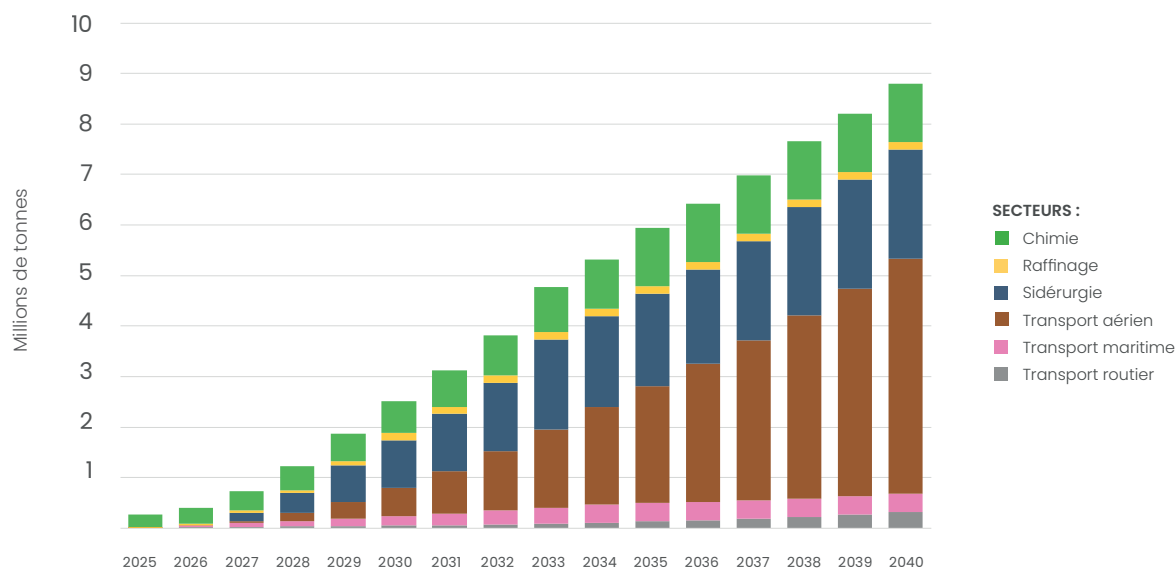


### QU'EST-CE QUE L'HYDROGÈNE ÉLECTROLYTIQUE ?

L'hydrogène électrolytique est l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau, procédé qui décompose l'eau ( $H_2O$ ) en dioxygène ( $O_2$ ) et dihydrogène ( $H_2$ ) gazeux grâce à de l'électricité. L'hydrogène électrolytique ainsi obtenu peut en plus être qualifié de bas carbone quand l'électricité utilisée par le procédé d'électrolyse est elle-même bas carbone.

# LA VISION

## SECTEUR PAR SECTEUR



**HYDROGÈNE ÉLECTROLYTIQUE.** Scénario SISYPHE de la demande européenne.

### 1 | DEUX SECTEURS TRÈS DYNAMIQUES : SIDÉRURGIE ET TRANSPORT AÉRIEN

En 2030, la sidérurgie serait le principal moteur de la demande en hydrogène électrolytique. Le secteur affiche un plan de décarbonation très ambitieux et organisé, reposant en partie sur des solutions de fours DRI (*Direct Reduction of Iron*) utilisant de l'hydrogène.

Le secteur du transport aérien va être soumis dès 2030 à des cibles d'incorporation d'e-kérosène imposées par la réglementation européenne *ReFuelEU Aviation*, qui impliquent un besoin d'hydrogène croissant jusqu'en 2050. Du fait de ces cibles réglementaires et des volumes en jeu, il représenterait plus de la moitié de la demande d'hydrogène à partir de 2035.

### 2 | DES INCERTITUDES FORTES SUR LA CONVERSION DES UTILISATEURS « HISTORIQUES » D'HYDROGÈNE FOSSILE : CHIMIE ET RAFFINAGE

Le secteur de la chimie va être soumis à des cibles d'incorporation d'hydrogène renouvelable dès 2030. Les acteurs interrogés soulignent l'absence en l'état de modèle économique viable. De plus, ces cibles pourraient ne pas s'appliquer aux producteurs d'ammoniac qui représentent presque deux tiers des consommations d'hydrogène fossile du secteur aujourd'hui. Une bascule vers l'hydrogène électrolytique impliquerait un changement majeur de leur appareil de production, qui n'est pas envisagé avant 2040 par la plupart des acteurs.

Du fait notamment de l'électrification du transport routier, l'avenir d'une partie des raffineries est incertain, ce qui ne les incite pas à réaliser des investissements importants pour se décarboner. Certaines seront reconverties en bioraffineries, avec un besoin en hydrogène associé qui aujourd'hui est difficilement quantifiable.

### 3 | UNE PERSPECTIVE DE DEMANDE LIMITÉE POUR LE TRANSPORT MARITIME ET ROUTIER D'ICI 2030

Le secteur du **transport maritime affiche une volonté de transition même s'il n'est pour le moment soumis qu'à une cible d'incorporation d'e-carburant faible** à horizon 2034, sans contrainte additionnelle au-delà. Sur la base de cette cible réglementaire, la demande resterait limitée alors que le potentiel du secteur est important.

Pour le secteur du **transport routier, la technologie hydrogène pour les véhicules légers est mature mais le véhicule à batteries s'impose aujourd'hui sur les marchés**. Le poids lourd à hydrogène n'est qu'au stade de démonstrateur chez la plupart des constructeurs européens. A contrario, le **passage à l'échelle industrielle du véhicule utilitaire léger à hydrogène** pourrait être un levier de la demande d'ici 2030, sous réserve du développement des stations d'avitaillement, le réseau étant aujourd'hui embryonnaire.

### 4 | PRIORITÉ À L'ÉLECTRIFICATION POUR LA PÉTROCHIMIE ET LA PRODUCTION DE CHALEUR POUR L'INDUSTRIE

L'utilisation de l'hydrogène « énergie » pour la **production de chaleur industrielle en remplacement du gaz naturel n'est pas l'option privilégiée** par les acteurs interrogés de ces deux secteurs. La plupart envisage l'électrification de leurs procédés.

Un besoin important d'hydrogène électrolytique pourrait venir de la production de plastiques à partir de e-naphta en remplacement du naphta dérivé du pétrole. Cependant, l'utilisation de e-naphta n'est pas envisagée à court ou moyen terme par le secteur de la pétrochimie.

## UNE MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDE S'APPUYANT SUR LES RETOURS DES INDUSTRIELS ET LES CONTRAINTES RÉGLEMENTAIRES

Peu d'industriels interrogés ont à date une vision de ce que sera précisément leur consommation en hydrogène sur la décennie 2030-2040. Aussi, l'étude SISYPHE repose sur un cadrage quantitatif reflétant la dynamique **engagée** telle qu'elle est ressortie des entretiens.

La trajectoire de la demande en hydrogène électrolytique a été définie en considérant les hypothèses suivantes :

- Un maintien de la demande en carburant pour le transport maritime et aérien ainsi que de la demande en hydrogène du secteur de la chimie ;

- Un respect des réglementations européennes imposées aux secteurs du transport aérien, du transport maritime et de la chimie (hors ammoniac) ;
- La prise en compte des projets engagés à date dans les secteurs de la sidérurgie, de la production d'ammoniac et du raffinage ;
- Un développement très progressif de la mobilité routière, essentiellement tiré par le déploiement de flottes des véhicules utilitaires légers.

Cette trajectoire est donc **le reflet de la dynamique des projets engagés et des réglementations fixées en 2023**. Elle ne préjuge donc pas des nouvelles réglementations qui pourraient survenir.



# DES FREINS IDENTIFIÉS... MAIS AUSSI DES LEVIERS D'ACCÉLÉRATION ■



R&D SUR L'EHT. Installation de dépôt de revêtement anticorrosion par voie chimique en phase vapeur.

## 1 | LES FREINS : PRIX, RÉGLEMENTATION ET DISPONIBILITÉ DE L'HYDROGÈNE ÉLECTROLYTIQUE

Si de nombreux industriels souhaitent passer à l'hydrogène électrolytique, l'étude SISYPHE relève cependant un certain nombre de freins limitant aujourd'hui son développement :

- Un prix élevé de l'hydrogène électrolytique et de ses molécules dérivées (ammoniac, méthanol...) par rapport à leurs équivalents fossiles.
- Une réglementation européenne jugée trop contraignante ou trop fluctuante.
- Des difficultés d'approvisionnement en hydrogène électrolytique à court et moyen terme, notamment en raison :

- D'une faible disponibilité de l'électricité bas carbone ;
- De risques de retards dans le raccordement des sites au réseau électrique de grande puissance ;
- De l'absence d'infrastructures de transport d'hydrogène ;
- D'une offre restreinte d'électrolyseurs de grande puissance.

Ces freins pourraient entraîner la délocalisation hors d'Europe non seulement de la production d'hydrogène et de ses molécules dérivées mais également de certaines productions « finales » (engrais azotés, acier...) plus faciles à transporter. **Un développement limité de l'hydrogène augmente le risque de désindustrialisation de l'Europe, entraînant de facto une perte de souveraineté.**

## 2 | DES LEVIERS : DAVANTAGE D'ÉLECTRICITÉ BAS CARBONE ET D'ÉLECTROLYSEURS, DES MÉCANISMES D'AIDES SIMPLES ET INCITATIFS

Des inflexions apparaissent indispensables pour accélérer le développement des projets et réussir la transition vers l'hydrogène électrolytique en Europe. L'activation d'un certain nombre de leviers permettrait de dépasser les chiffres projetés dans l'étude et d'atteindre les objectifs :

- **Accélérer le développement de capacités de production d'électricité bas carbone (renouvelables et nucléaires) en Europe.**
- **Assurer le passage à l'échelle des installations de production d'hydrogène et de molécules dérivées** notamment en développant de la R&D appliquée pour accélérer la fiabilisation des électrolyseurs de forte puissance et leur industrialisation.
- **Clarifier et stabiliser les mécanismes de support,** avec des dotations financières en cohérence avec les objectifs. Les acteurs interrogés plaident pour des règles s'inspirant des dispositifs de l'IRA (*Inflation Reduction Act*) qui sont perçus comme beaucoup plus simples et incitatifs.

## 3 | DE L'IMPORTANCE DU LIEU DE PRODUCTION D'HYDROGÈNE

Si notre étude est focalisée sur la demande européenne en hydrogène, elle pose nécessairement la question de la localisation de la production associée à cette demande :

- **Une production locale d'hydrogène est envisagée pour les pays disposant d'une électricité faiblement carbonée et/ou bénéficiant d'un fort potentiel EnR (pays nordiques, France, péninsule ibérique).**
- Par contre, **les pays du Benelux et d'Europe centrale et orientale au potentiel EnR plus limité pourraient se tourner vers l'importation d'hydrogène,** impliquant un enjeu fort de développement d'infrastructures.

## L'I-TÉSÉ

L'INSTITUT DE RECHERCHE ET D'ÉTUDES EN ÉCONOMIE DE L'ÉNERGIE DU CEA

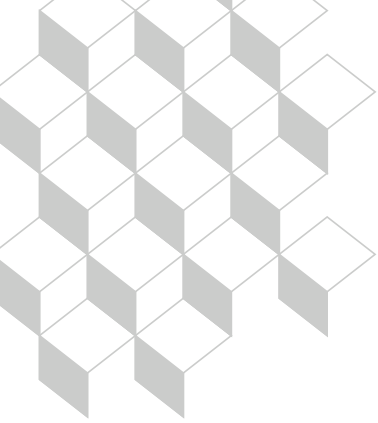
L'étude SISYPHE a bénéficié de l'expertise des équipes I-Tésé. Les travaux de l'institut portent sur l'économie et la soutenabilité de la transition énergétique vers la neutralité carbone et s'articulent autour des thématiques suivantes :

- Tech-éco des solutions bas carbone de production et de stockage (nucléaire, renouvelables, hydrogène, batteries...).

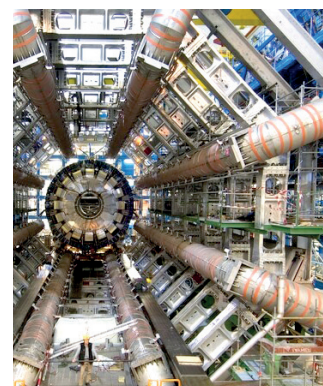
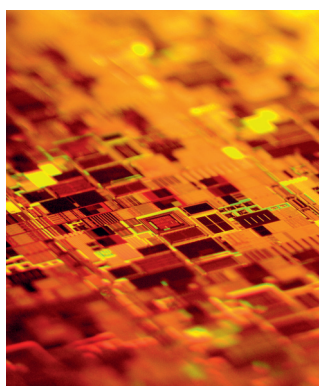
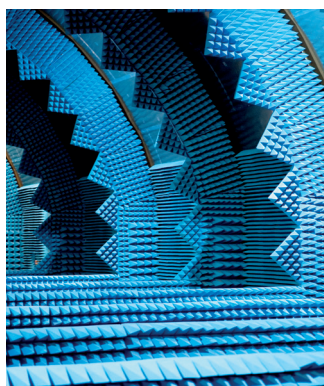
- Ressources-clés de la transition.
- Impacts des évolutions des modes de vie sur la demande.
- Organisation et régulation des marchés.

La vision systémique proposée par I-Tésé s'appuie sur l'utilisation de modèles numériques et de méthodes développées au sein de l'Institut.





**Le rôle du CEA est d'éclairer la décision publique et de donner les moyens scientifiques et technologiques aux forces vives (entreprises et collectivités), pour mieux maîtriser les mutations sociétales majeures : transition énergétique, numérique, santé du futur, défense et sécurité globale. Ses 20 000 collaborateurs et collaboratrices travaillent au cœur des territoires dans 9 centres équipés de très grandes infrastructures de recherche, dans le cadre de partenariats académiques et industriels en France, en Europe et à l'international.**



**Acteur majeur de la recherche, du développement et de l'innovation, le CEA intervient dans quatre domaines :**

- LES ÉNERGIES BAS CARBONE**  
(NUCLÉAIRE ET RENOUVELABLES)
- LA DÉFENSE ET LA SÉCURITÉ**
- LA RECHERCHE TECHNOLOGIQUE POUR L'INDUSTRIE**
- LA RECHERCHE FONDAMENTALE**  
(SCIENCES DE LA MATIÈRE ET SCIENCES DE LA VIE)

Depuis sa création, l'organisme s'engage au service de la souveraineté scientifique, technologique et industrielle de la France et de l'Europe, pour un présent et un avenir mieux maîtrisés et plus sûrs.

Il apporte aux pouvoirs publics et aux industriels les éléments d'expertise et d'innovation pour la mise en œuvre d'un système énergétique bas carbone.

Avec une approche intégrée du système énergétique, le CEA mène des travaux sur les modes de production d'énergie bas carbone (énergie nucléaire, solaire PV, NTE), leurs interactions au sein du réseau (stockage, pilotage, conversion), la problématique des ressources dans une logique de cycle fermé des matières, le tout prenant en compte les dimensions technico-économiques, environnementales et sociétales.