

Investissements d'Avenir

Programme et Équipement Prioritaire de Recherche

« *Hydrogène décarboné* »



Appel à projets

« *AAP H2 vague 1* »

Date de clôture de l'appel à projets
31/01/2022 à 11h00 (heure de Paris)

Adresse de consultation de l'appel à projets
<http://anr.fr/PEPR-H2-AAP>

RÉSUMÉ

La stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné, programmée sur la décennie 2020-2030, s'articule autour de trois priorités :

- Décarboner l'industrie en faisant émerger une filière française de l'électrolyse avec 6,5 GW d'électrolyseurs installés en 2030 ;
- Développer une mobilité lourde à l'hydrogène décarboné ;
- Soutenir la recherche, l'innovation et le développement de compétences afin de favoriser les usages de demain.

Le Programme et Equipement prioritaire de recherche (PEPR) hydrogène décarboné a pour vocation de soutenir des activités de R&D amont (TRL entre 1 et 4) au plus haut niveau mondial, en support aux industriels de la filière et répondant aux priorités définies dans le cadre de la stratégie nationale. Des projets ciblés ont déjà été identifiés et construits dans ce cadre et sont en cours de lancement.

En complémentarité à ces projets ciblés, le PEPR lance un premier appel à projets, couvrant cinq thèmes :

- L'électrolyse de l'eau à basse température (EBT)
- La production d'hydrogène par photo(électro)catalyse
- La combustion de l'hydrogène
- Le stockage de l'hydrogène en milieu liquide ou sous forme d'ammoniac
- L'intégration des PEM (Proton Exchange Membrane) dans des systèmes pour application au transport lourd

Cet appel est destiné à soutenir des consortiums d'équipes de recherche publique.

MOTS-CLÉS

Electrolyse de l'eau à basse température, photo(électro)catalyse, cellules photo(électro)chimiques, systèmes hybrides, combustion de l'hydrogène, stockage cryogénique de l'hydrogène, stockage en milieu liquide de l'hydrogène, ammoniac, système pile à combustible, électronique de puissance et hybridation associés au système pile

DATES IMPORTANTES

CLÔTURE DE L'APPEL À PROJETS

Les éléments du dossier de soumission doivent être déposés sous forme électronique, y compris les documents signés par le responsable légal de chacun des partenaires, impérativement avant le :

31 JANVIER 2022 À 11H (HEURE DE PARIS)

sur le site :

<https://investissementsdavenir.agencerecherche.fr/PEPR-H2-AAP>

Les personnes habilitées à représenter l'Établissement coordonnateur et les Établissements partenaires du projet devront signer une lettre d'engagement qui confirmera notamment les apports (financiers, humains, locaux, ...) sur la durée du projet.

CONTACTS ANR

PEPR-H2@anr.fr

CHARGÉ DE PROJET SCIENTIFIQUE : PIERRE BONNET

RESPONSABLE DE PROGRAMME : PASCAL BAIN

Il est nécessaire de lire attentivement l'ensemble du présent document et les instructions disponibles sur le site de soumission des dossiers :

<https://investissementsdavenir.agencerecherche.fr/PEPR-H2-AAP>

Pour toute question : PEPR-H2@anr.fr

SOMMAIRE

Résumé	2
Mots-clés	2
Contacts ANR.....	3
Sommaire	4
1. Contexte et objectifs de l'appel à projets	5
1.1. Contexte du programme	5
1.2. Objectifs de l'appel à projets.....	6
1.3. Rôle des pilotes du PEPR pour cet appel à projets	6
2. Thématiques de l'appel et projets attendus.....	7
2.1. Thématiques.....	7
2.2. Principales caractéristiques des projets	15
3. Examen des projets proposés	16
3.1. Procédure de sélection.....	16
3.2. Critères de recevabilité.....	16
3.3. Critères d'évaluation	17
4. Dispositions générales pour le financement.....	18
4.1. Financement.....	18
4.2. Accords de consortium	18
4.3. Science ouverte	19
4.4. Aide d'État	20
5. Modalités de soumission	20
5.1. Contenu du dossier de soumission	20
5.2. Procédure de soumission.....	21
5.3. Conseils pour la soumission.....	21

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'APPEL À PROJETS

1.1. CONTEXTE DU PROGRAMME

La stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné, programmée sur la décennie 2020-2030, s'articule autour de trois priorités :

- Décarboner l'industrie en faisant émerger une filière française de l'électrolyse avec 6,5 GW d'électrolyseurs installés en 2030 ;
- Développer une mobilité lourde à l'hydrogène décarboné ;
- Soutenir la recherche, l'innovation et le développement de compétences afin de favoriser les usages de demain.

Le Programme et Equipements Prioritaires de Recherche (PEPR) sur l'Hydrogène décarboné s'inscrit dans le cadre de cette dernière priorité, et son pilotage est assuré par le CNRS (représenté par M. Abdelilah Slaoui, directeur scientifique adjoint à l'INSIS et responsable de la Cellule Energie du CNRS) et le CEA (représenté par Mme Hélène Burlet, directrice adjointe des programmes Energies au CEA).

Le PEPR-H2 a pour vocation de soutenir des activités de R&D amont (TRL entre 1 et 4) au plus haut niveau mondial, en support aux industriels de la filière et répondant aux priorités définies dans le cadre de la stratégie nationale.

Ce PEPR-H2 couvre les problématiques de production d'hydrogène sans émissions de CO₂, de son utilisation pour la mobilité lourde (motorisation électrique, et motorisation thermique), et de son stockage embarqué. Des travaux seront également menés pour accompagner le déploiement des systèmes hydrogène à travers des analyses de cycle de vie, des études technico-socio-économiques et des aspects sécurité.

Le programme comporte quatre types d'actions de recherche et une action de pilotage :

- 7 Projets Ciblés (PC) dont les thèmes et les consortia ont été identifiés avec l'objectif de répondre efficacement à des enjeux scientifiques et technologiques majeurs pour un déploiement rapide des filières hydrogène.
- Des appels à projets, dont celui-ci qui comprend cinq axes sur des thématiques identifiées qui nécessitent des investigations approfondies avec l'objectif de proposer des solutions viables et transférables au monde industriel.
- Un appel à manifestation d'intérêt portant sur deux thématiques transversales à savoir Analyse socio-économique et études d'impacts, et Analyses de cycle de vie des systèmes à hydrogène. Cet appel doit servir à repérer les communautés travaillant sur ces thèmes, identifier les verrous scientifiques associés aux problématiques et enfin construire des projets présentant les meilleures chances de réussite.
- L'Equipex+ Durability qui a pour objectif de doter les laboratoires de recherche académique de nouveaux moyens d'essais très performants pour l'étude de la durabilité des technologies hydrogène-énergie, avec un focus sur les piles à combustible et les

électrolyseurs de forte puissance de type PEM en conditions opératoires représentatives des applications visées (stationnaire, embarqué terrestre, aéronautique). Ces équipements seront mis à disposition pour la réalisation des projets ciblés autour des PEM, ainsi que des projets issus de l'appel à projets.

- L'action de pilotage comprend le suivi scientifique et budgétaire de tous les projets, la coordination entre eux, la vérification de leur adéquation avec la stratégie nationale et le plan de relance, la dissémination des résultats vers la communauté scientifique et le grand public et leurs valorisations scientifiques et industrielles.

1.2. OBJECTIFS DE L'APPEL À PROJETS

Cet appel à projets se positionne en complémentarité des projets ciblés et de l'équipex DurabilitHy , sur des sujets qui demandent des travaux de recherche exploratoires.

Cet appel est doté d'une enveloppe d'au moins 15 M€.

Il vise à financer des projets de recherche à des niveaux de TRL situés entre 1 et 4, destinés à apporter des éléments de connaissance indispensables aux développements des technologies et usages de l'hydrogène et favoriser l'émergence de ces technologies avant leur transfert vers le secteur industriel.

Les projets attendus devront être portés par un organisme de recherche ou un établissement de recherche et d'enseignement supérieur public français.

1.3. RÔLE DES PILOTES DU PEPR POUR CET APPEL À PROJETS

Dans le cadre de cet appel à projets, les pilotes ont été en charge de la préparation du texte décrivant les objectifs, le périmètre scientifique et les thèmes de l'appel. Notamment, il s'agissait d'assurer la cohérence et la complémentarité de cet appel avec les projets ciblés d'une part et avec l'ensemble de la stratégie nationale d'autre part.

Les pilotes scientifiques du PEPR proposeront au Secrétariat Général Pour l'Investissement la désignation des projets qui pourraient être financés et le montant d'aide qui pourrait leur être définitivement attribué (cf 3.Examen des projets proposés).

Enfin, les pilotes scientifiques suivent les projets lauréats lors de revues annuelles ou biannuelles en fonction de leur taille avec le porteur du projet, en concertation avec l'ANR et le coordinateur de la stratégie nationale. Il s'agira de discuter des avancées scientifiques et de dissémination, mais également d'évoquer les points relatifs aux ressources humaines et aux équipements, ainsi que les difficultés rencontrées.

2. THÉMATIQUES DE L'APPEL ET PROJETS ATTENDUS

2.1. THÉMATIQUES

Cet appel à projet comporte cinq axes :

- Axe 1. Electrolyse de l'eau à Basse Température (EBT)
- Axe 2. Production d'hydrogène par photo(électro)catalyse
- Axe 3. Combustion de l'hydrogène
- Axe 4. Stockage de l'hydrogène en milieu liquide et sous forme d'ammoniac
- Axe 5. Intégration des PEM dans des systèmes pour application au transport lourd.

Ces axes sont décrits ci-dessous.

Un projet ne peut se positionner que sur un seul axe.

AXE-1. Electrolyse de l'eau à Basse Température (EBT)

L'axe « Electrolyse de l'eau basse température » vise à soutenir des travaux de recherche amont, permettant de prospecter de nouvelles idées et méthodes et d'étudier des concepts en rupture afin d'optimiser l'électrolyse de l'eau à basse température. Avec des perspectives d'application à moyen et long termes, notamment au-delà d'un horizon de 15 ans, cet axe a pour ambition de mobiliser largement et transposer au domaine de l'électrolyse basse température des connaissances fondamentales, des méthodes et des outils issus des disciplines des sciences de la matière, de l'ingénieur et du numérique, et à susciter des projets de recherche rassemblant des compétences issues d'un large spectre de communautés scientifiques.

L'électrolyse alcaline basse température à diaphragme est une technologie déjà mature à l'échelle industrielle. Cependant, le coût de l'hydrogène produit reste incompatible avec les demandes des nouveaux marchés (industrie, mobilité, services réseaux). De plus, elle demeure difficilement combinable avec des sources d'énergie renouvelables, par essence intermittentes, en raison de leur temps de réponse élevé.

Les nouvelles technologies de type PEM (Proton Exchange Membrane) et AEM (Anion Exchange Membrane) pourraient permettre de réduire ces temps de réponses. Mais pour abaisser les coûts de production de l'hydrogène pour ces technologies, de nombreux verrous scientifiques et technologiques restent à lever concernant l'utilisation de métaux critiques (catalyseurs à base de métaux du groupe du platine) ou en tension (cobalt et nickel), leur stabilité sur le long-terme, le coût des membranes échangeuses d'ions (polymères perfluorosulfoniques) et le rendement de conversion de l'énergie électrique. Les matériaux pour les catalyseurs, supports et électrodes sont très proches, voire identiques, pour les deux technologies d'électrolyse alcaline, à diaphragme et AEM ; elles pourront donc bénéficier toutes les deux de leurs développements.

Les actions de R&D en rupture devraient permettre de réduire le coût des technologies d'électrolyseurs et d'augmenter leur efficacité, fiabilité et durabilité, notamment en développant de nouveaux matériaux et procédés de fabrication/assemblage, et en améliorant les procédés de pilotage des électrolyseurs.

De manière non-exhaustive, les sujets suivants peuvent d'être abordés :

- Matériaux et milieux innovants : compréhension, élaboration et caractérisations avancées, réduction/substitution des matériaux critiques, activation des réactions électrochimiques, phénomènes interfaciaux, nano-structuration, bio-inspiration, fabrication d'assemblages complexes et réactifs, etc.
 - Nouveaux matériaux pour catalyseurs à teneur réduite en métaux du groupe du platine (PGM) capables d'augmenter la densité de courant actuelle ainsi que le développement de supports adaptés afin de réduire les coûts de fabrication :
 - Catalyseurs faiblement chargés en PGM pour cathode (généralement à base de platine pour la production d'hydrogène) et anode (généralement à base d'oxydes d'iridium et de ruthénium pour l'oxydation de l'eau) d'électrolyseurs PEM.
 - Catalyseurs sans PGM pour cathode (production d'hydrogène) et d'anode (oxydation de l'eau) d'électrolyse alcaline à diaphragme et AEM, voire PEM.
 - Support de catalyseurs d'anode et de cathode sans PGM, poreux et stables dans les conditions d'utilisation, permettant de réduire les coûts de fabrication des électrodes.
 - Etudes des performances en conditions d'électrolyse PEM, alcaline à diaphragme et AEM, et comparaison des coûts.
 - Modélisation et simulations multi-échelles et multi-physiques pour assister l'élaboration des nouveaux électrocatalyseurs.
 - Membranes protoniques et anioniques extrêmement conductrices, étanches aux gaz et pouvant supporter des différentiels de pression élevés.
 - Couches de transport poreuses à faible teneur en titane pour anode d'électrolyseur PEM.
 - Protection contre la passivation des couches de transport poreuses des anodes d'électrolyse PEM à moindre coût.
- Procédés innovants pour l'électrolyse basse température : compréhension des phénomènes et comportements en lien avec des propriétés structurales ou physico-chimiques ou de surface de matériaux fonctionnels (transport/transfert de matière et de chaleur, etc.)
 - Développement de techniques *in situ/operando* de compréhension des processus pour obtenir une densité de courant accrue sans nuire à la durée de vie, au rendement ou à la sécurité.
 - Simulations multi-échelles des procédés, des systèmes : écoulements multiphasiques et/ou turbulents, gestion des bulles de gaz.
- Caractérisations avancées des processus : méthodes expérimentales et instrumentations innovantes (multi-échelles spatiales et temporelles), couplages multi-physiques, caractérisations *operando*, définition de tests de dégradation accélérés et de méthodologies d'extrapolation de données ou de mesures sur des temps longs.

- Mise au point de tests accélérés permettant la détermination des mécanismes de dégradation de chacun de ces matériaux et la mise au point de stratégies d'atténuation.
 - Etudes des hétérogénéités de fonctionnement et de vieillissement à l'échelle de la monocellule/du stack.
- Conception assistée par modélisation/simulation, y compris prédictive, de l'échelle atomique vers les matériaux, milieux, interfaces, procédés et dispositifs (méthodes *ab-initio*, moléculaires, dont basées sur l'intelligence artificielle, remontée d'échelles, simulation multi-échelles des propriétés fonctionnelles, des mécanismes de vieillissement, de dégradation, etc).
 - Vieillessement, systèmes auto-réparant, modélisation de systèmes et procédés agiles ou polyvalents, approches méthodologiques pour la modélisation des systèmes.
 - Analyse de cycle de vie de système d'électrolyse de l'eau basse température basée sur le développement des nouveaux matériaux et/ou des procédés/systèmes innovants.

Compte-tenu du caractère amont et exploratoire des recherches attendues, les projets devront indiquer clairement comment leurs résultats pourront contribuer à la résolution de problématiques dans le domaine de l'électrolyse basse température, sans qu'il soit nécessaire de fournir une analyse quantitative.

Durée maximale des projets : 5 ans

Mots-clés associés : électrocatalyseurs, matériaux durables, nanostructuration, bio-inspiration, processus interfaciaux, systèmes auto-réparants, réactivité chimique, conversion et transferts énergétiques, thermique, approches multi-échelles (spatiale, temporelle), mesures physicochimiques in situ et operando, remontée d'échelle, vieillissement, modélisation, systèmes, métrologies et instrumentation, ACV.

AXE-2 : Production d'hydrogène par photo(électro)catalyse

La photocatalyse, la photoélectrochimie (PEC) ou l'intégration intime de composants photovoltaïques et d'électrolyse (notamment les feuilles artificielles popularisées par Daniel Nocera – Harvard ou les systèmes photoélectrochimiques intégrés (IPEC) développés par Sophia Haussener) apparaissent comme des voies prometteuses pour produire de l'hydrogène à partir d'énergie solaire, propre et renouvelable.

Cet axe « Production d'hydrogène par photo(électro)catalyse » vise à soutenir des travaux de recherche amont, permettant de prospecter de nouvelles idées et méthodes et d'étudier des concepts en rupture. Avec des perspectives d'application à moyen et long termes, notamment au-delà d'un horizon de 15 ans, cet axe a pour ambition de mobiliser largement et transposer au domaine de la photo-production d'hydrogène des connaissances fondamentales, des méthodes et des outils issus des disciplines des sciences de la matière, des matériaux moléculaires, de l'ingénieur et du numérique, et à susciter des projets de recherche rassemblant des compétences en provenance d'un large spectre de communautés scientifiques.

En effet, si la faisabilité de différentes approches a été démontrée à l'échelle du laboratoire, il reste de nombreuses questions scientifiques fondamentales à résoudre avant que la photo-production d'hydrogène puisse être mise en œuvre à une échelle technique significative le long de la chaîne de valeur. Parmi les facteurs limitants l'efficacité et *in fine* le développement de ces technologies, il y a (i) les performances encore limitées des matériaux photo(électro)catalytiques pour ce qui concerne l'absorption de lumière, la séparation de charges photo-induites et l'interface avec les catalyseurs, (ii) la stabilité de ces matériaux en conditions d'utilisation, (iii) l'utilisation de matériaux critiques (notamment catalyseurs à base de métaux nobles) et/ou de procédés de fabrication énergivores qui limitent la possibilité de déployer ces technologies à grande échelle et (iv) le peu de retour d'expérience sur la mise au point de prototypes intégrés de photo-production d'hydrogène.

Les actions de R&D en rupture devraient consister notamment à développer de nouveaux matériaux, à les caractériser en détail (également en conditions de fonctionnement), à appréhender les mécanismes associés pour permettre d'améliorer performances, stabilité et déploiement de ces technologies pour conduire à la réalisation de prototypes.

Sans exhaustivité, les sujets suivants peuvent d'être abordés :

- Développement des divers composants inorganiques d'électrodes et photoélectrodes: catalyseurs, semi-conducteurs, nanomatériaux plasmoniques etc. ;
- Développement de (photo)catalyseurs et photoélectrodes moléculaires et/ou bio-inspirés/biomimétiques pour la production d'H₂ et d'O₂ (photosynthèse artificielle), études mécanistiques ;
- Amélioration de l'absorption de la lumière, de la séparation des charges photogénérées et des interfaces catalyseurs/semi-conducteurs des matériaux photo(électro)catalytiques ;
- Etudes de nouveaux régimes de photo(électro)catalyse (activité/stabilité) ;
- Développement de nouvelles techniques de caractérisations spectroscopiques, techniques couplées, *operando* ;
- Développement assisté par modélisation de nouvelles générations de matériaux photo(électro)catalytiques : semi-conducteurs, constructions moléculaires ;
- Modélisations multiphysiques et multi-échelles des phénomènes mis en œuvre ;
- Développement de systèmes hybrides catalyseurs/semi-conducteurs inorganiques/constructions moléculaires ;
- Etude des problèmes de corrosion et de la modification des propriétés de surface des photoélectrodes et matériaux ;
- Développement de procédés de mise en forme des cellules et prototypes/génie chimique associé ; développement de procédés de mise en forme des cellules (photochimiques, photoélectrochimiques, feuilles artificielles et IPEC) et de dispositifs de gestion des flux de photons
- Mesure de performance, critères méthodologiques de comparaison des performances, indicateurs de performance.

Sont exclus :

- Les sources d'hydrogène carbonées

- Les procédés autres que photo(electro)catalytique

Compte-tenu du caractère amont et exploratoire des recherches attendues, les projets devront indiquer clairement comment leurs résultats pourront contribuer à la résolution de problématiques dans le domaine de la photo(électro)catalyse, sans qu'il soit nécessaire de fournir une analyse quantitative.

Durée maximale des projets : 5 ans

Mots-clés associés : photocatalyse, photoélectrocatalyse, photoélectrodes, catalyseurs, cellules photochimiques, cellules photoélectrochimiques, systèmes hybrides, stabilité, spectroscopie

AXE-3. Combustion de l'hydrogène

La conversion thermomécanique de l'hydrogène peut faire partie du panel de solutions efficaces contribuant à la décarbonation du secteur de production d'électricité, des transports ou de l'industrie, que ce soit à partir de sa combustion directe, ou à partir de celle de ses dérivés, tels que l'ammoniac ou les carburants, synthétisés à partir de CO₂ capté. L'avantage majeur de ces 'electro-fuels' est principalement leur forte densité énergétique de stockage par rapport aux batteries.

La non présence de carbone dans l'hydrogène en fait un candidat potentiel pour des systèmes totalement décarbonés. Toutefois, ses caractéristiques physico-chimiques (telle que sa diffusivité, sa masse volumique ...) induisent des difficultés d'allumage et de stabilité de la combustion, rendant son contrôle difficile. De plus, la combustion de l'hydrogène peut impliquer un niveau d'émissions de NO_x inacceptable lié à la présence de zones trop élevées en température qui doit être réduite à partir de technologies innovantes. Il est donc nécessaire de revoir la conception des brûleurs et des chambres de combustion pour optimiser non seulement les performances des systèmes énergétiques basées sur la combustion de l'hydrogène mais aussi pour diminuer les émissions polluantes en optimisant des modes de combustion peu exploités jusqu'à présent. Enfin, les hauts niveaux de température délivrés par la combustion de l'hydrogène ainsi que la forte production d'eau produite nécessitent l'utilisation de matériaux adéquats au niveau des parois.

Sans exhaustivité, les sujets suivants peuvent d'être abordés :

- Validation de la cinétique de formation de NO_x lors de la combustion de l'hydrogène ;
- Optimisation de l'oxy-combustion de l'hydrogène pour limiter les NO_x ;
- Optimisation des systèmes de combustion de l'hydrogène en mélange pauvre ;
- Contrôle des systèmes de combustion de l'hydrogène partiellement pré-mélangé ou étagés ;
- Nouveaux matériaux optimisés pour la combustion de l'hydrogène (température, corrosion).

Durée maximale des projets : 4 ans

Mots-clés associés : hydrogène, combustion, réaction chimique, NO_x, flamme

AXE-4. Stockage de l'hydrogène en milieu liquide ou sous forme d'ammoniac

« Vers de nouveaux vecteurs liquide à haute efficacité et sécurité accrue pour le stockage de l'hydrogène »

Les solutions de stockage de l'hydrogène sous forme liquide (Hydrogène liquide cryogénique, Liquid Organic Hydrogen Carrier-LOHC, ammoniac), grâce à des capacités massiques et volumiques élevées en hydrogène, sont particulièrement attrayantes pour les applications de transport massif de l'énergie, pour les usages stationnaires ou la mobilité.

- L'hydrogène liquide cryogénique (LH2) est un moyen classique de stockage et transport de l'hydrogène avec une bonne densité volumique et massique. Cette technologie présente cependant l'inconvénient d'une dépense énergétique élevée pour l'étape de liquéfaction (de l'ordre de 30% du PCI) et de pertes importantes sous forme d'évaporation dite « *boil-off* » (0,5 à 2% / jour) qui peuvent s'avérer limitant pour certains usages (véhicules particulier, stockage longue durée) ;
- Les LOHC sont des molécules organiques liquides capables de stocker de l'hydrogène de façon réversible jusqu'à 7% massique (pour rappel l'hydrogène comprimé est à 5% wt à 700 bars) avec des conditions d'hydrogénation/déshydrogénation modérées. La réversibilité des réactions d'hydrogénation/déshydrogénation via des catalyseurs et le caractère liquide des molécules, compatible avec les infrastructures pétrolières existantes, permettent d'envisager cette technologie pour du stockage et du transport massif d'énergie sur de longues distances et sur des temps longs (saisonnier). Cette technologie est envisagée pour du stockage stationnaire, ou pour de transport lourd de type maritime. Néanmoins, la forte endothermicité de la réaction de déshydrogénation des molécules de l'état de l'art (de l'ordre de 25% du PCI) limite le potentiel de cette technologie, et implique des travaux sur le développement de nouvelles molécules et de la catalyse associée ainsi que sur de nouveaux types de réacteurs-échangeurs ;
- L'ammoniac liquide apparaît comme un très bon candidat pour le stockage chimique de l'énergie grâce à sa densité énergétique élevée. L'ammoniac est produit à grande échelle selon le procédé Haber-Bosch (HB) dans des conditions opératoires sévères (450 °C, 200 atm). L'hydrogène nécessaire à ce processus est produit à partir de gaz naturel, émettant 3% du CO₂ anthropogénique. Des efforts sont nécessaires pour développer de nouveaux procédés compatibles avec une production décentralisée d'hydrogène et améliorer l'efficacité énergétique des différentes étapes de son utilisation : synthèse et liquéfaction, décomposition.

Pour chacune de ces options, la diminution de l'empreinte énergétique lors des étapes amont (liquéfaction du LH2, synthèse et liquéfaction de NH₃) ou aval (déshydrogénation des LOHC, décomposition NH₃) au transport du media liquide est un paramètre primordial qu'il convient de développer via des travaux sur les matériaux et les procédés. Par ailleurs, la garantie d'un niveau de sécurité au moins équivalent aux technologies actuelles est une condition *sine qua none* de l'essor d'une filière hydrogène. Il convient dès lors d'appréhender, pour chacune des options,

les principaux phénomènes dangereux liés d'une part au changement d'échelle en passant d'un usage localisé et principalement en milieu industriel à un usage massif dans un environnement public et d'autre part à la mobilité lourde.

L'objectif de cet axe consiste donc pour le stockage d'hydrogène sous forme liquide, à proposer trois orientations de recherche avec pour chacune d'elle des verrous à lever :

- Stockage liquide cryogénique
 - Développement de nouveaux matériaux des récipients cryogéniques pour l'amélioration de l'efficacité énergétique et la réduction du *boil-off* ;
 - Analyse des comportements en situations extrêmes et accidentelles, de stationnement longue durée et le dimensionnement des organes de sécurité.
- Stockage en milieu liquide LOHC
 - Identification de nouvelles molécules et des catalyseurs associés ; étude du cyclage et une évaluation des performances économiques et environnementales ;
 - Réduction du coût énergétique global des opérations d'hydrogénation / déshydrogénation avec une modélisation de réacteur, le développement de réacteurs-échangeurs et de procédés alternatifs d'hydrogénation / déshydrogénation avec une efficacité énergétique globale des opérations et l'évaluation des performances économiques et environnementales de ces procédés.
- Stockage sous la forme d'ammoniac
 - Abaissement du coût énergétique de la synthèse d'ammoniac pour le stockage chimique d'hydrogène par le développement de catalyseurs bas coûts et de procédés de synthèse innovants de NH₃ pour atteindre une température de synthèse < 300°C, une pression de synthèse < 50 bars, et une évaluation des performances économiques et environnementales.

Ces différentes approches devront ouvrir de nouvelles perspectives dans l'amélioration ou le remplacement de matériaux et procédés actuels par l'utilisation de nouveaux matériaux et la conception d'unités de production compatibles avec les objectifs d'impacts scientifiques, technologiques et environnementaux.

Durée maximale des projets : 5 ans

Mots-clés associés : stockage liquide cryogénique de l'hydrogène, stockage en milieu liquide de l'hydrogène, ammoniac, catalyseurs, procédés

AXE-5. Intégration des PEM dans des systèmes pour application en transport lourd

Augmentation des performances et durée de vie des systèmes piles à combustible PEMFC par le système : composants auxiliaires pour systèmes piles à combustible PEMFC avec électronique de puissance dédiée

Les piles à combustible sont des convertisseurs d'énergie nécessitant un système actif pour acheminer, conditionner et évacuer les gaz réactifs et refroidir la pile. Ces différents sous-

systèmes engendrent une dynamique de réponse de la pile pouvant atteindre plusieurs secondes. Les objectifs de performance, durée de vie et de coût intègrent le stack et les différents sous-systèmes de la pile (groupe air, groupe hydrogène, groupe refroidissement et conversion électrique). Le coût total des sous-systèmes pile est de 50% pour une application automobile et de 25% pour une application transport lourd. En 2020, les objectifs du Department Of Energy (DOE) pour le transport sur les durées de vie et coûts des systèmes pile sont passés à 8000 heures sans changement de stack. L'optimisation des conditions opératoires du stack ou des systèmes multi-stacks est devenue la condition nécessaire pour garantir la durée de vie attendue. L'optimisation globale intégrant toute la chaîne de conversion avec les auxiliaires et les fonctions de diagnostic de la pile, ne sont pas, à ce jour, traitées de manière systémique. De plus, une hybridation avec une autre source d'énergie, par un couplage direct ou au travers d'une interface d'électronique de puissance dédiée, peuvent être nécessaires pour assurer la dynamique et stabiliser la tension dans une certaine plage en fonction de l'application. Les architectures électriques d'un système PAC sont en partie dépendantes des architectures fluidiques et thermiques, mais également de l'application finale.

Une hybridation avec une source d'énergie électrique (batterie, super-capacité (SC)) est très souvent nécessaire. L'hybridation a deux objectifs principaux : i/ optimiser le dimensionnement du système énergétique (pile/batterie) en diminuant la taille de la pile par exemple, ii/ optimiser le pilotage du système pile, par exemple en optimisant les points de fonctionnement de la pile pour maximiser son rendement sous contrainte de durée de vie. La mise en œuvre d'une hybridation nécessite des composants de conversion électrique d'interface. Les convertisseurs électriques existants sont souvent mal dimensionnés ou mal intégrés dans la globalité de la chaîne énergétique. De plus, dans un objectif de montée en puissance, il peut être intéressant, voir nécessaire, de considérer des approches modulaires, s'appuyant notamment sur des architectures multi-stacks. L'étage de conversion permettant l'interconnexion de ces systèmes multi-stacks offre alors des degrés de liberté supplémentaires, permettant d'améliorer certains critères tels que la durabilité des systèmes pile, la qualité de l'énergie, ou encore la fiabilité des chaînes de conversion en proposant des fonctionnements en mode dégradé.

Le domaine d'application visé sur ce volet est la mobilité lourde terrestre et peut être étendue à d'autres domaines à fortes contraintes d'intégration (de type aéronautique). Les différents composants du système pile à combustible développés devront de plus présenter une modularité compatible avec des typologies de véhicules lourds très variées tout en respectant des coûts de production acceptables par ce marché.

Afin d'atteindre les objectifs de performance, durée de vie, coût et fiabilité, et sans être exhaustif, les sujets suivants peuvent d'être abordés :

- **Optimisation des architectures systèmes et de leurs contrôles.** L'objectif est de contrôler de manière optimale les conditions opératoires du système pile tout en minimisant le nombre de

composants (suppression de l'humidificateur avec boucle de recirculation en air,...) en fonction des meilleures architectures systèmes, notamment du mode d'alimentation en hydrogène (recirculation par éjecteur, pompe, dead end...);

- **Optimisation de certains composants auxiliaires** dont les convertisseurs de puissance (nouvelles topologies de convertisseur de puissance électrique, mutualisation d'électronique de puissance entre les différents auxiliaires, compresseur, intégration de composants au plus près de la pile, vannes...);
- **Optimisation de l'hybridation de la pile** (architecture avec hybridation directe pile/batterie ou des μ -hybridations avec SC, architectures modulaires multi-stack ...);
- **Intégration des stratégies de diagnostic et contrôle tolérant aux défauts au niveau système**, en s'appuyant à la fois sur les données disponibles au niveau des systèmes auxiliaires et sur l'électronique de puissance pour la génération de stimuli permettant d'aider à la détection de dégradation ou de défauts.

Les objectifs visés, pour une maturité technologique de TRL3, sont :

- Une augmentation du rendement système pile
- Une augmentation de la durée de vie d'un stack
- Une augmentation de la dynamique de réponse d'un système pile
- Une augmentation de la puissance des systèmes pile à combustible (en recourant notamment à des approches multi-stacks)

La capitalisation de ces développements s'appuiera sur une démarche de type jumeau numérique et plateforme de prototypage rapide (approche XiL), du système pile et son électronique de puissance.

Durée maximale des projets : 5 ans

Mots clés associés : véhicules lourds, systèmes piles à combustible, auxiliaire, performances, fiabilité, convertisseurs de puissance, hybridation, jumeau numérique

2.2. PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES PROJETS

Les projets seront nécessairement collaboratifs (minimum de deux structures de recherche différentes). La complémentarité des équipes devra être explicitée.

Le caractère innovant des travaux proposés devra être mis en avant. Les solutions technologiques développées devront être caractérisées par une faible empreinte environnementale. Le recours à des matériaux critiques devra être évité.

Les projets auront une durée comprise entre 3 et 5 ans pour les axes 1, 2, 4 et 5 et entre 3 et 4 ans pour l'axe 3.

La demande d'aide minimale doit être de 600k€.

3. EXAMEN DES PROJETS PROPOSÉS

3.1. PROCÉDURE DE SÉLECTION

Les projets recevables (cf. § 3.2) seront évalués par un comité de sélection indépendant à dimension internationale. Ce comité pourra recourir, le cas échéant, à des expertises externes et pourra procéder à une audition des porteurs des projets.

À l'issue de ses travaux, le comité de sélection remettra aux pilotes scientifiques du PEPR Hydrogène décarboné un rapport comprenant :

- 1) les notes attribuées aux projets évalués selon les critères indiqués au § 3.3,
- 2) la liste des projets que le comité recommande pour financement en raison de leur qualité, évaluée sur la base des critères indiqués au § 3.3,
- 3) la liste des projets que le comité propose de ne pas financer en raison d'une qualité qu'il juge insuffisante sur au moins l'un des critères indiqués au § 3.3.

Chaque projet évalué fera l'objet d'un argumentaire justifiant de sa position sur l'une des deux listes. Le comité pourra formuler un avis sur le montant des financements demandés.

Les pilotes scientifiques du PEPR proposeront au Secrétariat Général Pour l'Investissement la désignation des projets qui pourraient être financés et le montant d'aide qui pourrait leur être définitivement attribué. Le Premier ministre, après avis du SGPI, arrêtera la décision concernant les bénéficiaires et les montants accordés. Chaque projet fera l'objet d'une convention entre l'ANR et l'établissement coordinateur du projet, détaillant les obligations réciproques des parties.

Les membres du comité de sélection ainsi que les éventuels experts externes sollicités s'engagent à respecter les règles de déontologie et d'intégrité scientifique établies par l'ANR. La charte de déontologie de l'ANR est disponible sur son site internet. L'ANR s'assurera du strict respect des règles de confidentialité, de l'absence de liens d'intérêt entre les membres du comité ou experts externes et les porteurs et partenaires des projet, ainsi que de l'absence de conflits d'intérêts pour les membres du comité et experts externes. En cas de manquement dûment constaté, l'ANR se réserve le droit de prendre toute mesure qu'elle juge nécessaire pour y remédier. La composition du comité de sélection sera affichée sur le site de publication de l'appel à projets à l'issue de la procédure de sélection.

3.2. CRITÈRES DE RECEVABILITÉ

IMPORTANT

Les dossiers ne satisfaisant pas aux critères de recevabilité ne seront pas soumis au comité de sélection et ne pourront en aucun cas faire l'objet d'un financement.

- 1) Le dossier de soumission doit être déposé complet sur le site de soumission de l'ANR avant la date et l'heure de clôture de l'appel à projets. De plus, le document administratif et financier et les lettres d'engagement signés par chaque établissement partenaire et scannés doivent être déposés sur le site de soumission de l'ANR à la date et l'heure indiquées en page 3.
- 2) Le document scientifique du projet doit impérativement suivre le modèle disponible sur le site internet de l'appel à projets et être déposé au format PDF non protégé. Il ne doit pas dépasser 20 pages.
- 3) Le projet aura une durée comprise entre 3 et 5 ans pour les axes 1, 2, 4 et 5, et entre 3 et 4 ans pour l'axe 3.
- 4) L'aide demandée devra être d'un montant minimum de 600 k€.
- 5) Un même responsable de projet ne pourra être porteur que d'un seul projet.
- 6) L'établissement coordinateur doit être un organisme de recherche ou un établissement français d'enseignement supérieur et de recherche français.
- 7) Le consortium devra être constitué d'au moins deux partenaires du type laboratoire d'organisme de recherche ou d'établissement de recherche et d'enseignement supérieur français public.
- 8) Sont exclus également les projets qui causeraient un préjudice important du point de vue de l'environnement (application du principe DNSH – Do No Significant Harm ou « absence de préjudice important ») au sens de l'article 17 du règlement européen sur la taxonomie.

3.3. CRITÈRES D'ÉVALUATION

Les experts externes et les membres du comité de sélection sont appelés à examiner les propositions de projet selon les critères d'évaluation ci-dessous regroupés en trois grandes catégories.

1) Excellence et ambition scientifique :

- Clarté des objectifs et des hypothèses de recherche ;
- Caractère novateur, ambition, originalité, rupture méthodologique ou conceptuelle du projet par rapport à l'état de l'art ;
- Pertinence de la méthodologie.

2) Qualité du consortium, moyens mobilisés et gouvernance :

- Compétence, expertise et implication du responsable du projet : capacité à coordonner des consortia pluridisciplinaires et ambitieux, parcours scientifique, reconnaissance internationale,

- Qualité et complémentarité du consortium scientifique au regard des objectifs du projet ;
- Adéquation entre les moyens humains et financiers mobilisés (y compris ceux demandés dans le cadre du projet) par rapport aux objectifs visés ;
- Pertinence du calendrier, gestion des risques scientifiques et solutions alternatives, crédibilité des jalons proposés ;
- Pertinence et efficacité de la gouvernance du projet (pilotage, organisation, animation, mise en place de comités consultatifs, etc.).

3) Impact et retombées du projet :

- Capacité du projet à répondre aux enjeux de recherche de l'axe scientifique choisi ;
- Impacts économiques et sociétaux, contribution au développement de solutions en réponse aux enjeux des domaines prioritaires de la Stratégie Nationale ;
- Stratégie de diffusion (*in itinere* et *ex post*) et de valorisation des résultats, adhésion aux principes FAIR, Open Science et promotion de la culture scientifique ;

4. DISPOSITIONS GÉNÉRALES POUR LE FINANCEMENT

4.1. FINANCEMENT

Les appels financés au titre du PEPR présentent un caractère exceptionnel et se distinguent du financement récurrent des établissements universitaires ou de recherche.

Les financements alloués représentent des moyens supplémentaires destinés à des actions nouvelles. Ils pourront permettre le lancement de projets de recherche innovants, et financer, par exemple, l'achat d'équipements ainsi que des dépenses de personnel affecté spécifiquement à ces projets et de fonctionnement associé.

Les dépenses éligibles sont précisées dans le règlement financier relatif aux modalités d'attribution des aides de l'action PEPR. Le soutien financier sera apporté sous la forme d'une dotation, dont le décaissement est effectué par l'ANR pour l'établissement coordinateur du projet, selon l'échéancier prévu dans la convention, sur la durée du projet.

Cet appel à projets sera présenté à la Commission européenne pour faire partie du plan de relance national dans le cadre de la facilité de relance et résilience (FRR).

4.2. ACCORDS DE CONSORTIUM

Les projets financés conduits en partenariat devront établir un accord de consortium (dans les 12 mois suivant la communication de l'accord de financement) précisant les droits et obligations de chaque établissement partenaire du projet. Cet accord précisera :

- la répartition de la dotation financière, des tâches et des livrables entre les différents partenaires, ainsi que les moyens humains et financiers mobilisés en propre par ces derniers ;
- les modalités scientifiques, techniques et financières d'accès aux ressources partagées entre les partenaires ;
- les modalités de valorisation des résultats obtenus à l'issue des recherches et de partage de leur propriété intellectuelle et industrielle.

4.3. SCIENCE OUVERTE

Dans le cadre de la contribution de l'ANR à la promotion et à la mise en œuvre de la science ouverte, et en lien avec le Plan national pour la science ouverte au niveau français (PNSO) et le Plan S au niveau international, les bénéficiaires de la subvention PIA s'engagent à garantir le libre accès immédiat aux publications scientifiques évaluées par les pairs et à adopter, pour les données de recherche, une démarche dite FAIR (Facile à trouver, Accessible, Interopérable, Réutilisable) conforme au principe « aussi ouvert que possible, aussi fermé que nécessaire ». Ainsi, toutes les publications scientifiques issues de projets financés dans le cadre des PEPR, seront rendues disponibles en libre accès sous la licence Creative Commons CC-BY ou équivalente, en utilisant l'une des trois voies suivantes :

- publication dans une revue nativement en libre accès ;
- publication dans une revue par abonnement faisant partie d'un accord dit transformant ou journal transformatif¹ ;
- publication dans une revue à abonnement. La version éditeur ou le manuscrit accepté pour publication sera déposé dans l'archive ouverte HAL par les auteur.e.s sous une licence CC- BY en mettant en œuvre la Stratégie de non-cession des droits (SNCD), selon les modalités indiquées dans les conditions particulières de la décision ou convention de financement.

De plus, l'Établissement coordinateur s'engage à ce que le texte intégral de ces publications scientifiques (version acceptée pour publication ou version éditeur) soit déposé dans l'archive ouverte nationale HAL, au plus tard au moment de la publication, et à mentionner la référence ANR du projet de recherche dont elles sont issues.

L'ANR encourage à déposer les pré-prints dans des plateformes ouvertes ou archives ouvertes et à privilégier des identifiants pérennes ou uniques (DOI ou HAL Id, par exemple). Par ailleurs, l'ANR recommande de privilégier la publication dans des revues ou ouvrages nativement en accès ouvert².

¹ Définition d'accord dit [transformant](https://www.coalition-s.org/faq-theme/publication-fees-costs-prices-business-models/) ou [journal transformatif](https://www.coalition-s.org/faq-theme/publication-fees-costs-prices-business-models/) : <https://www.coalition-s.org/faq-theme/publication-fees-costs-prices-business-models/>

² Le site DOAJ (<https://doaj.org/>) répertorie les revues scientifiques dont les articles sont évalués par les pairs et en libre accès. Le site DOAB (<https://www.doabooks.org/>) fait de même pour les monographies.

Enfin, l'Établissement coordinateur s'engage à fournir dans les 6 mois qui suivent le démarrage du projet, une première version du Plan de Gestion des Données (PGD) selon les modalités indiquées dans la convention attributive d'aide.

4.4. AIDE D'ÉTAT

Les aides versées dans le cadre du présent appel à projets sont soumises à la réglementation européenne relative aux aides d'État (articles 107, 108 et 109 du Traité sur le fonctionnement de l'Union européenne et textes dérivés), dès lors qu'elle est qualifiable d'aide d'État. Ainsi, ce financement doit respecter les règles européennes relatives aux aides d'État et s'inscrire dans le cadre du Règlement (UE) n°651/2014 de la Commission du 17 juin 2014 déclarant certaines catégories d'aides compatibles avec le marché intérieur en application des articles 107 et 108 du traité.

5. MODALITÉS DE SOUMISSION

5.1. CONTENU DU DOSSIER DE SOUMISSION

Le dossier de soumission devra comporter l'ensemble des éléments nécessaires à l'évaluation scientifique et technique du projet. Il devra être déposé avant la clôture de l'appel à projets, dont la date et l'heure sont indiquées page 3.

IMPORTANT

Aucun élément complémentaire, autre que les lettres d'engagement des partenaires, ne pourra être accepté après la clôture de l'appel à projets dont la date et l'heure sont indiquées page 3.

Les documents devront être déposés sur le site de soumission dont l'adresse est mentionnée page 3. Afin d'accéder à ce service, il est indispensable d'obtenir au préalable l'ouverture d'un compte (identifiant et mot de passe). Pour obtenir ces éléments, il est recommandé de s'inscrire le plus tôt possible.

Le dossier de soumission complet est constitué de trois documents intégralement renseignés :

- 1) le « document scientifique », d'une longueur maximum de 20 pages, rédigé préférentiellement en anglais³, comprenant une description du projet envisagé, selon le format fourni, avec en annexe la liste des publications scientifiques des trois dernières années des chercheurs/équipes proposant le projet ;

³ Si le document est rédigé en français et qu'il s'avère impossible de trouver suffisamment d'experts francophones sans conflits d'intérêt, une traduction en anglais à remettre sous un délai de 8 jours sera demandée au responsable du projet.

- 2) le « document administratif et financier », qui comprend la description administrative et budgétaire du projet ;
- 3) les lettres d'engagement signées par les établissements partenaires.

Les éléments du dossier de soumission (document administratif et financier au format Excel / modèles de document scientifique et de lettre d'engagement au format Word) seront accessibles à partir de la page web de publication du présent appel à projets (voir adresse page 3).

5.2. PROCÉDURE DE SOUMISSION

Les documents du dossier de soumission devront être transmis par le responsable du projet :

SOUS FORME ÉLECTRONIQUE impérativement :

- avant la date de clôture indiquée page 3 du présent appel à projets,
- sur le site web de soumission selon les recommandations en 5.3.

L'inscription préalable sur le site de soumission est nécessaire pour pouvoir soumettre un projet.

Seule la version électronique des documents de soumission présente sur le site de soumission à la clôture de l'appel à projets est prise en compte pour l'évaluation.

UN ACCUSÉ DE RÉCEPTION, sous forme électronique, sera envoyé au responsable du projet lors du dépôt des documents.

NB : La signature des lettres d'engagement permet de certifier que les partenaires du projet sont d'accord pour soumettre le projet conformément aux conditions décrites dans le document administratif et financier ainsi que dans le document scientifique et ses éventuelles annexes.

5.3. CONSEILS POUR LA SOUMISSION

Il est fortement conseillé :

- d'ouvrir un compte sur le site de soumission au plus tôt ;
- de ne pas attendre la date limite d'envoi des projets pour la saisie des données en ligne et le téléchargement des fichiers (attention : le respect de l'heure limite de soumission est impératif) ;
- de vérifier que les documents déposés dans les espaces dédiés des rubriques « documents de soumission » et « documents signés » sont complets et correspondent aux éléments attendus. Le dossier de soumission et le dépôt des documents signés ne pourront être validés par le responsable du projet que si l'ensemble des documents a été téléchargé ;
- de consulter régulièrement le site internet dédié au programme, à l'adresse indiquée page 1, qui comporte des informations actualisées concernant son déroulement ;
- de contacter, si besoin, les correspondants par courrier électronique, à l'adresse mentionnée page 3 du présent document.