

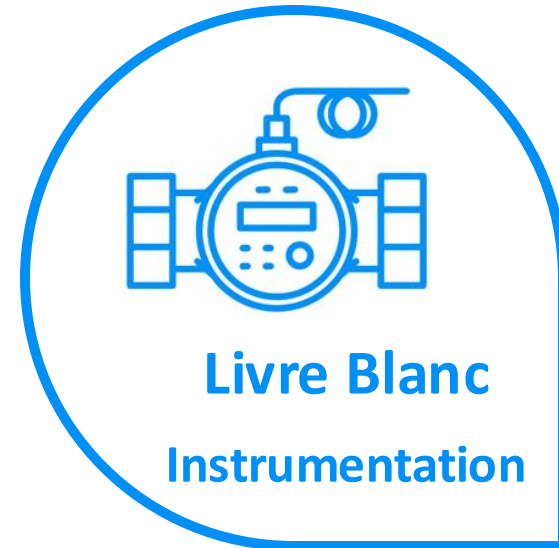
Guide des Solutions Hydrogène

de la filière électronique



Une publication **GIMELEC**

dans le cadre de son partenariat avec



Introduction



À propos de la Commission Hydrogène du GIMELEC

La Commission Hydrogène du GIMELEC rassemble plus de cinquante industriels, actifs sur l'ensemble de la chaîne de valeur de l'hydrogène, depuis sa production jusqu'à son usage (industrie, mobilité, H₂-to-Power...) en passant par son transport et son stockage. Leurs solutions permettent d'accompagner les développeurs de projet et d'optimiser le fonctionnement, la sécurité, les coûts et l'empreinte environnementale des installations hydrogène.

<https://gimelec.fr/hydrogene>



À propos de ce guide

Cette publication s'adresse aux développeurs de projets et intégrateurs. Elle a été réalisée par le GIMELEC, dans le cadre de son partenariat avec France Hydrogène. **La première partie est un « Livre Blanc »** permettant d'identifier les enjeux et contraintes pour chaque maillon de la chaîne de valeur hydrogène ; la [deuxième partie](#) présente les solutions permettant d'y répondre et constitue un annuaire des entreprises du GIMELEC.

Les entreprises du GIMELEC proposent notamment des solutions pour l'alimentation électrique des électrolyseurs, l'automatisation et l'instrumentation. Cette section du guide est consacrée à l'instrumentation.



À propos du GIMELEC

Le GIMELEC fédère les entreprises de la filière électronique française. Nos 210 adhérents conçoivent, fabriquent et déploient les solutions d'électrification, d'automatisation et de digitalisation pour l'industrie, les bâtiments, la mobilité, les infrastructures énergétiques et numériques.

<https://gimelec.fr>



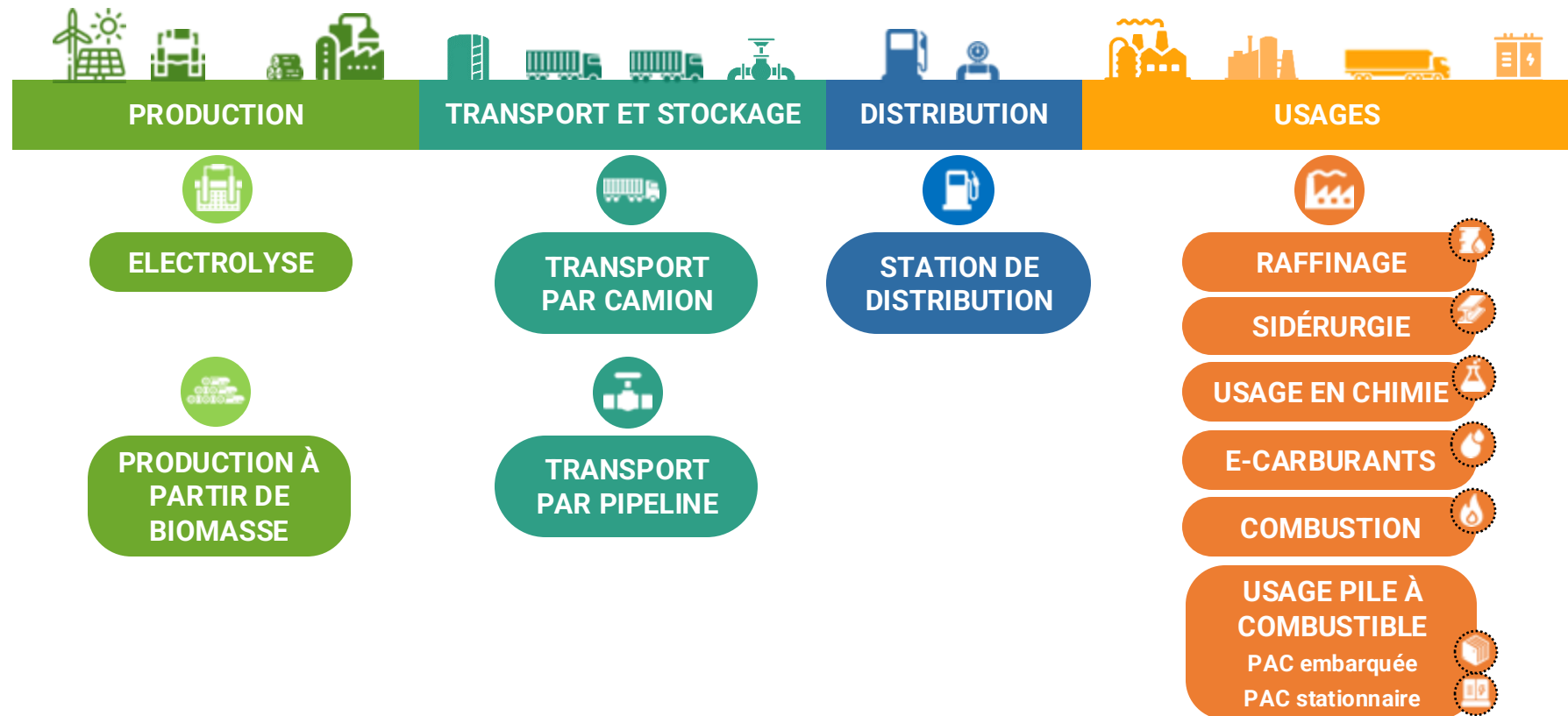
À propos de France Hydrogène

Réunissant 450 membres, France Hydrogène fédère les acteurs de la filière française de l'hydrogène structurés sur l'ensemble de la chaîne de valeur : grands groupes industriels, PME-PMI, start-ups, laboratoires et centres de recherche, associations, pôles de compétitivité et collectivités territoriales.











Le GIMELEC est partenaire de France Hydrogène, et ce document s'inscrit dans la continuité et en complémentarité du [Panorama des solutions hydrogène](#) édité par France Hydrogène.

Enjeux d'instrumentation dans la chaîne de valeur H₂

Ce Livre Blanc permet d'**introduire les enjeux d'instrumentation de plusieurs systèmes hydrogène matures**. Les entreprises de la filière accompagnent les développeurs et fabricants en proposant des **solutions de mesure et d'analyse adaptées** pour répondre aux enjeux de pilotage, performance, durabilité, fiabilité, qualité, pureté, sécurité et compatibilité à l'hydrogène. Les technologies et systèmes de la chaîne de valeur H₂ traités dans ce catalogue sont **répartis selon les cas d'applications suivants** :



Sommaire des cas d'applications

- | | | | | | |
|-------|---|---|----------------------|---|--|
| p. 5 |  | Électrolyse de l'eau | p. 11 |  | Sidérurgie (réduction directe à l'hydrogène) |
| p. 6 |  | Production à partir de biomasse | p. 12 |  | Usage en chimie industrielle |
| p. 7 |  | Conditionnement et transport par camion | p. 13 |  | Les électro-carburants (e-fuels) |
| p. 8 |  | Transport par pipeline & injection réseau | p. 14 |  | La combustion industrielle hydrogène |
| p. 9 |  | La station de distribution | p. 15 |  | Usages Pile à combustible |
| p. 10 |  | Raffinage du pétrole | p. 16 |  | Principales réglementations à l'échelle européenne |
| | | | lien |  | Annuaire des solutions et entreprises du GIMELEC |

Familles de produits

A chaque cas d'application peuvent correspondre une ou plusieurs familles de produits. Ce guide répertorie les **6 familles de produits suivantes** :



Ces familles de produits sont systématiquement reprises pour les cas d'applications présentés dans les pages suivantes



Électrolyse de l'eau

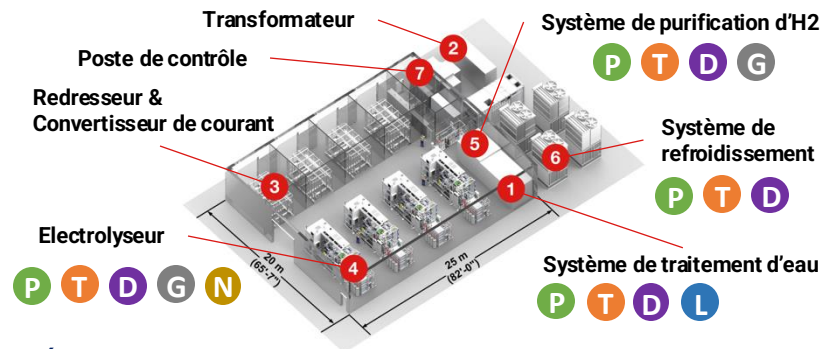


« Une instrumentation adaptée à la mise en puissance et au niveau de performance exigé »

L'électrolyse de l'eau est une méthode qui vise à **séparer la molécule d'eau en hydrogène et en oxygène** par application d'un courant électrique. Il existe 4 grandes familles technologiques présentant chacune leur maturité, avantage et inconvénient : Alcalin, PEM, Haute température, AEM.

Le **caractère multi-physique** des systèmes d'électrolyse entraîne des enjeux de sécurité et de pilotage nouveaux pour les exploitants qui, dans un contexte de montée en puissance de l'industrie, recherchent **une instrumentation adaptée aux spécificités de l'hydrogène** pour optimiser leur procédé.

Schéma système d'une unité d'électrolyse (PEM)



LÉGENDE

- | | | |
|--------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| P Mesure de pression | G Analyse gaz | D Mesure de débit |
| T Mesure de température | L Analyse liquide | N Mesure de niveau |

Les unités d'électrolyse sont divisées en **2 niveaux** :

- **L'électrolyseur composé du stack d'électrolyse** (le cœur de l'unité de production où se déroule le processus électrochimique)
- **Le « balance of plant » composé des équipements auxiliaires** (traitement et gestion des fluides, refroidissement, purification, briques électriques...)

Enjeux pour la technologie d'électrolyse



Pilotage/Performance

Le contrôle simultané des pressions, températures et débits assure le maintien des performances (efficacité, durabilité) et permet de **réduire les coûts énergétiques & de maintenance**.



Qualité d'hydrogène et d'eau

L'extrême sensibilité des piles à combustible PEM impose des exigences de **pureté à l'H2** en sortie d'électrolyse et de **pureté de l'eau** utilisée. L'eau est le seul intrant d'un électrolyseur ; sa pureté est donc critique pour assurer la **performance sur la durée de vie**. La demande porte sur une conductivité <2µS/cm pour une majorité des clients (PEM & ALK) et parfois <0,1µS/cm; cela nécessite l'utilisation de plusieurs instruments analytiques.



Sécurité

Une instrumentation adaptée permet d'éviter l'accumulation importante de concentrations d'O2 dans le flux d'H2 (et inversement), la surpression et la surchauffe de l'électrolyseur.

Exigences induites

Exigence H2 : 99,97% (mobilité), et mesure de gaz de 14 impuretés critiques

Exigence eau : Conductivité < 0,1µS/cm / 0 dureté, 0 particule, 0 ion (~1mg/L)

Enjeux matériaux des capteurs : corrosion, hydruration, fragilisation sous l'hydrogène, perméation hydrogène, tenue aux cycles de température, pression

Certifications : ATEX, MID-002, ISO 14687, ISO 19880-8

Production à partir de biomasse



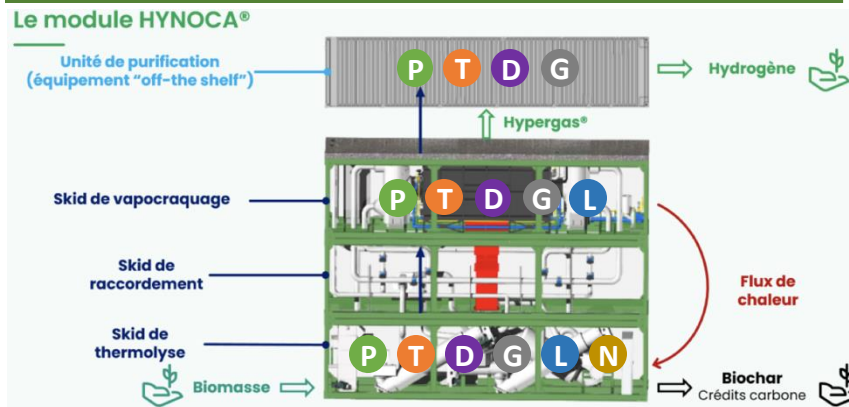
« Une instrumentation adaptée au niveau de qualité attendu »

Il existe deux grandes voies de production à partir de biomasse :

La pyrogazéification et la thermolyse.

La pyrogazéification est la succession de deux procédés : la pyrolyse (procédé de décomposition thermique) et la gazéification (procédé de transformation de la partie carbonée et liquide produite par pyrolyse), permettant de **produire un gaz de synthèse (syngaz) principalement composé d'H₂, CO, CO₂ (et d'H₂O).**

Schéma système d'une unité de thermolyse



LÉGENDE

- | | | |
|--------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| P Mesure de pression | G Analyse gaz | D Mesure de débit |
| T Mesure de température | L Analyse liquide | N Mesure de niveau |

La thermolyse est une voie particulière (plus mature que la pyrogazéification) qui consiste à chauffer de la biomasse **à 500 °C en l'absence d'oxygène**, pour **produire du syngaz et du biochar (résidu solide)**. Le syngaz est par la suite chauffé à 1000°C dans un four de craquage pour obtenir un hypergas (syngas particulièrement riche en hydrogène). Après traitement de cet hypergas (séparation et purification), de l'hydrogène de qualité « mobilité » est obtenu.

Enjeux pour la thermolyse de la biomasse



Qualité de gaz

Les caractéristiques de la matière fournie doivent être particulièrement homogènes. En effet, de la **qualité et de la mise aux spécifications des intrants** (humidité, granulométrie, PCI, taux de poussières, etc.) dépendront le bon fonctionnement des procédés et la qualité des composés énergétiques produits.

De plus, le gaz en sortie de thermolyse (hypergas) subit plusieurs opérations : des **étapes de lavage** (éliminant les traces de composés indésirables comme les suies résiduelles, le benzène et l'H₂S), puis des **étapes de purification** (WGS¹) et PSA²) afin d'obtenir un H₂ pur pour l'application PAC³.



Sécurité

Des capteurs mesurent la quantité de monoxyde de carbone. Dès que le seuil est dépassé, le personnel est averti et l'installation est immédiatement arrêtée. **Le risque de fuite de gaz** toxique ou inflammable est ainsi pratiquement éliminé.

Exigences induites

Exigence H₂ : 99,97% (mobilité), et mesure de gaz de 14 impuretés critiques

Exigence eau : Conductivité = <1µS/cm / 0 dureté

Enjeux matériaux des capteurs : corrosion, hydruration, fragilisation sous l'hydrogène, perméation hydrogène, H₂S, hautes températures.

Certifications : ATEX, MID-002, ISO 14687, ISO 19880-8

Notes: 1) WGS = Water Gas Shift Reaction; 2) PSA : Pressure Swing Absorption; 3) PAC = Pile à Combustible

Conditionnement & transport par camion



« Une instrumentation adaptée aux spécificités intrinsèques de l'hydrogène »

Le transport de l'hydrogène de la production jusqu'au point d'utilisation finale est un défi en raison de la faible densité énergétique volumétrique de l'hydrogène. La solution aujourd'hui la plus répandue pour stocker et transporter l'hydrogène est sa **compression sous forme gazeuse**.

100 kg

Transport sous pression par camion

L'hydrogène est comprimé entre **200 bar et 300 bar** dans des bouteilles ou tubes de volumes et technologies variables (acier ou composite). Les bouteilles ou tubes sont transportées par camion et chargées/déchargées sur le lieu de consommation. Ce type de transport baisse en compétitivité à partir d'une tonne d'hydrogène et au-delà d'un **rayon logistique de 150 km**.



P T D G

1 tonne

Transport liquide par camion

L'hydrogène est refroidi afin qu'il condense en phase liquide. Un camion-citerne adapté transporte ainsi un volume plus important que par cylindre d'hydrogène gazeux. La capacité de transport est de quelques tonnes et peut s'effectuer dans un **rayon logistique de 500 km**.



P T D L

LÉGENDE

- P Mesure de pression
- G Analyse gaz
- D Mesure de débit
- T Mesure de température
- L Analyse liquide

Les remorques en tubes d'acier les **plus couramment utilisées transportent environ 380 kg** ; leur capacité de charge étant limitée par le poids des tubes d'acier. Néanmoins, la masse d'hydrogène transporté par jour ainsi que la distance parcourue représentent des paramètres essentiels dans le choix du mode de transport. Ces paramètres peuvent justifier les choix de transports plus coûteux (ex : le transport liquide).

Enjeux pour le transport d'hydrogène par camion



Compatibilité avec l'hydrogène

L'instrumentation doit utiliser des matériaux compatibles à l'hydrogène afin d'éviter au maximum les phénomènes de **perméation et de fragilisation à l'hydrogène**.



Durée de vie

La durée de vie d'un réservoir de stockage d'hydrogène dépend principalement des facteurs tels que le matériau de fabrication (résine utilisée), la pression et la température de stockage, la fréquence d'utilisation et d'entretien. **La qualité de l'hydrogène stocké** est également un facteur important à prendre en compte.



Sécurité

En raison de la large gamme d'inflammabilité et des caractéristiques de combustion de l'hydrogène, il est essentiel de répondre aux préoccupations en matière de sécurité liées au transport de l'hydrogène, nécessitant l'approbation réglementaire.

Exigences induites

Exigence H2 : 99,97% (mobilité), mesure de gaz de 14 impuretés critiques
Pression jusqu'à 300 bars

Enjeux matériaux des capteurs : corrosion, hydruration, fragilisation sous l'hydrogène, perméation hydrogène, haute pression, résistance à la vibration, tenue mécanique et tenue à la fatigue dans un environnement embarqué.

Certifications : ATEX, MID-002, ISO 14687, ISO 19880-8, PED, TPED

Transport par pipeline & injection réseau

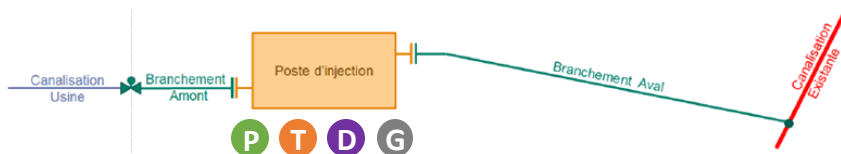


« Une instrumentation adaptée aux spécificités intrinsèques de l'hydrogène »

Un hydrogénéduct est une canalisation industrielle qui achemine de l'hydrogène **sous forme gazeuse à travers des conduites dédiées**. A ce jour, ces infrastructures sont adressées essentiellement dans le nord et dans le sud de la France sur des zones industrielles fortement consommatrices d'hydrogène.

L'injection réseau ou le « POWER-TO-GAS »

L'installation d'un réseau de transport par pipeline 100% hydrogène fait face à plusieurs problématiques : économiques (coûts d'installation importants), techniques (reconversion des réseaux actuels) et de sécurité (fragilisation à l'hydrogène). De ce fait, l'hydrogène est dans un premier temps valorisé via son injection dans les réseaux de gaz naturels. On parle de « Power to Gas ». La teneur dépend de l'infrastructure et des usages en aval. Actuellement, **la teneur maximum (en volume) qui peut être injectée est estimée à 20%**.



LÉGENDE

- P** Mesure de pression
- G** Analyse gaz
- D** Mesure de débit
- T** Mesure de température

Un réseau européen de transport par pipeline 100% H2 d'ici 2040

En Europe, l'initiative "European Hydrogen Backbone" (EHB) regroupe **33 opérateurs d'infrastructures gazières**. D'ici 2040, cette initiative vise à déployer **53 000 km** de pipelines hydrogène, dont 60% issus d'infrastructures gazières existantes reconverties ; les 40% restantes seront de nouvelles canalisations nécessaires.



Enjeux pour l'injection réseau et transport par pipeline



Compatibilité avec l'hydrogène

Fragilisation des aciers sous hydrogène et risque de fuites.

Les reconversions des canalisations existantes nécessiteront des **adaptations importantes**.



Modification des performances du réseau

L'ajout de 1% d'hydrogène dans le mélange hydrogène + gaz naturel provoque une **diminution de la valeur calorifique** d'environ 0,7%, influant la capacité de régulation offre-demande. Cela impose de disposer d'appareils de mesure adaptés.



Contrôle de qualité et sécurité

La présence d'hydrogène dans les réseaux de gaz peut avoir des **conséquences sur les risques et l'usure des équipements**.

Le poste d'injection contient tous les organes de contrôles de la qualité, de comptage et d'odorisation du gaz. Il a également pour rôle de sécuriser et de réguler l'injection de gaz dans le réseau.

Exigences induites

Exigence H2 : Réseau de distribution : 5-6 bar / Réseau de transport : 50-80 bar
Enjeux matériaux des capteurs : hydruration, fragilisation H2, perméation H2
Certifications : ATEX, MID-002, ISO 14687, ISO 19880-8, PED



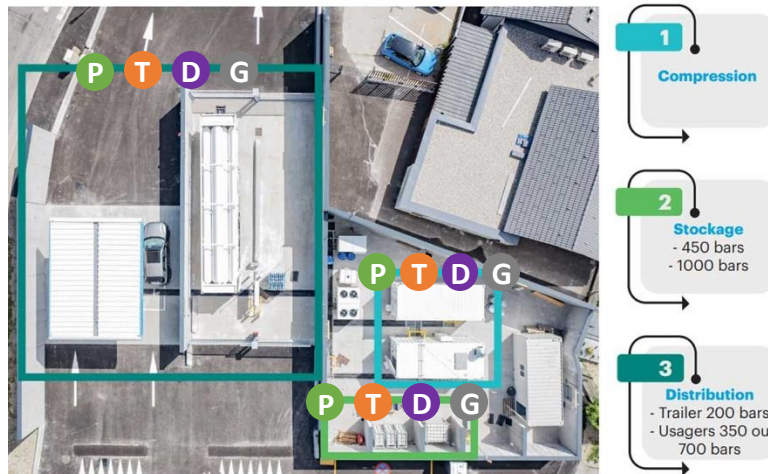
La station de distribution



« Une instrumentation adaptée à la très haute pression »

La distribution est la dernière phase avant l'usage final. **Le déploiement de la mobilité nécessite un maillage et une disponibilité des points de distribution.** Il existe divers types de stations de distribution d'hydrogène, adaptées en fonction des marchés ciblés.

Schéma d'une station hydrogène (vue aérienne)



LÉGENDE

- P** Mesure de pression
- G** Analyse gaz
- D** Mesure de débit
- T** Mesure de température

Chaque station comprend à minima :

- Un stockage H₂, une unité de compression, une ou des bornes de distribution.
- Une unité de refroidissement qui compense la chaleur d'expansion et permet des remplissages rapides à haute pression.
- Des systèmes de contrôles, de surveillance en temps réel et des dispositifs de sécurité : dispositifs de mesure de pression, température et débit, dispositifs d'arrêt et de purge, soupapes, TPRD¹⁾.

Enjeux pour la station hydrogène



Qualité d'hydrogène

L'extrême sensibilité des piles à combustible PEM impose des exigences de pureté à l'H₂ avant remplissage, ce qui nécessite l'utilisation de plusieurs instruments analytiques.



Compatibilité avec l'hydrogène & Sécurité

La perméation de l'hydrogène entraîne la **fragilisation du matériau** mais peut également entraîner des **modifications structurales du capteur** ; elles se traduisent par une dérive du signal qui a un impact sur la fiabilité et la précision à long terme de l'instrument. De plus, les températures et pressions élevées accélèrent la perméation et la fragilisation. Les capteurs doivent être fabriqués à partir d'alliages résistants à l'hydrogène pour assurer la sécurité et l'efficacité attendues.

Exigences induites

Exigence H₂ : 99,97% (mobilité), et mesure de gaz de 14 impuretés critiques
 450-500bar : pression à atteindre pour remplir à 350 bar
 900-1000bar : pression à atteindre pour remplir à 700 bar

Enjeux matériaux des capteurs : corrosion, hydruration, fragilisation sous l'hydrogène, perméation hydrogène, haute pression, résistance à la vibration, résistance à la très haute pression

Certifications : ATEX, MID-002, SAE J2601, SAE J2578, ISO 23273, ISO 14687, ISO 19880-8, PED, TPED

Notes: 1) TPRD = Thermal Pressure Relief Device

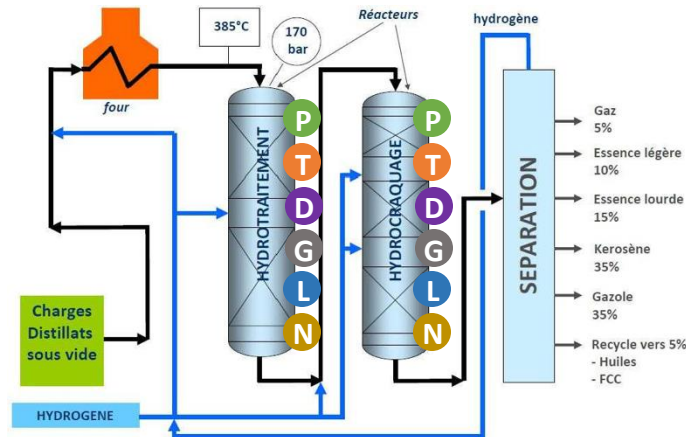
Raffinage du pétrole



« Une instrumentation adaptée à des consommations très massives d'hydrogène »

Le raffinage du pétrole est le procédé industriel historiquement le plus consommateur d'hydrogène dans le monde (46% de la consommation globale). La décarbonation des raffineries représente l'un des leviers identifiés de mise à l'échelle de la production d'hydrogène renouvelable. Nous parlons de **centaines milliers de tonnes d'hydrogène renouvelable consommés par an**, équivalent à l'installation d'électrolyseurs d'une puissance totale supérieure à 400MW.

Schéma simplifié du raffinage du pétrole



LÉGENDE

- (P) Mesure de pression
- (G) Analyse gaz
- (D) Mesure de débit
- (T) Mesure de température
- (L) Analyse liquide
- (N) Mesure de niveau

Nous notons deux procédés utilisant l'hydrogène :

- **L'hydrocraquage** : process de craquage catalytique dans lequel la présence d'hydrogène ajouté permet de casser les molécules d'hydrocarbures à longue chaînes en des coupes plus légères hautement valorisables.
- **L'hydrotraitement** : étape clé du raffinage du pétrole à 170 bars visant à ôter certains éléments présents dans les coupes pétrolières (élimination du soufre par hydrodésulfuration et de l'azote par hydrodézotation/hydrodénitration), qui sont des poisons pour les catalyseurs utilisés en raffinage.

Enjeux pour le raffinage du pétrole



Fiabilité/Durabilité

La spécificité de ce secteur mature et massif est l'enjeu de grands volumes consommés induisant de **grandes dimensions** de réacteurs, tuyaux (>25 DIN) et réservoirs. C'est un marché de renouvellement d'équipements où les enjeux de durabilité et de **maintenance prédictive** sont clés.



Pilotage/Performance

L'enjeu de **contrôle process** sur un secteur à gros volumes avec de faible marge requiert une performance de **métrologie** et une **digitalisation** croissante des mesures de débit, niveau, volume, température et pression.



Sécurité/Environnement

L'enjeu montant de **réduction des fuites** pour raison environnementale exige une instrumentation dédiée à la **détection de faibles fuites** sur de grandes installations.

Exigences induites

Exigence H2 : Pur à 99,9% (grade B), mesure de gaz de 4 impuretés critiques Pressions faibles (<30 bars) et élevée pour certains procédés.

Enjeux matériaux des capteurs : Résistance à haute température, H2, H2S H2O, usure mécanique et corrosion, fragilisation sous l'hydrogène

Certifications : ATEX, ESP, Sécurité et Normes Oil & Gas

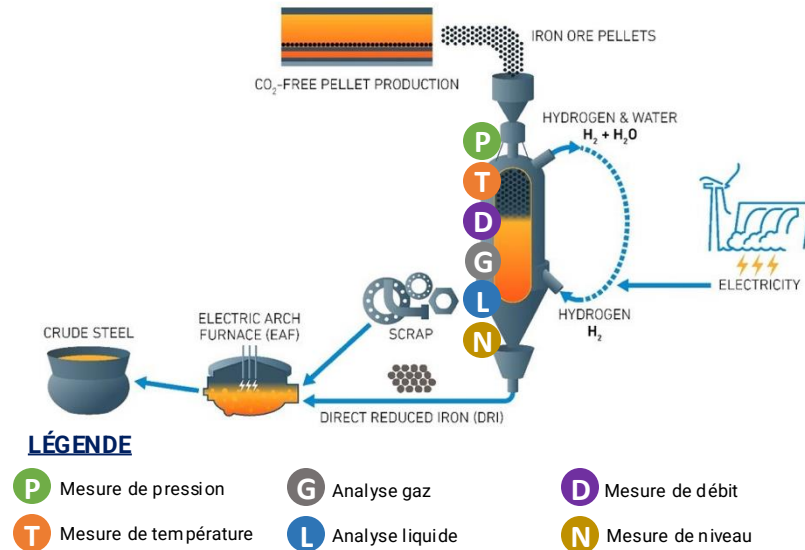
Sidérurgie (réduction directe à l'hydrogène)



« Une instrumentation adaptée à des utilisations intensives continues »

L'hydrogène est un moyen d'éliminer les émissions de CO2 dans l'étape de réduction du minerai de fer pour la production d'acier **en remplacement du coke ou GN**. ArcelorMittal a annoncé le remplacement de 3 hauts fourneaux par des installations de DRI¹⁾ à partir de 2027. Ces sites représenteraient « à eux seuls **25 % des émissions industrielles de gaz à effet de serre en France.** »

Schéma de la réduction directe du minerai de fer à l'hydrogène



Il y a **deux procédés pour transformer le minerai de fer en acier** : le haut fourneau (Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace, BF-BOF) et la réduction directe (**Direct Reduced Iron** – Electric Arc Furnace, DRI-EAF). Le premier domine largement le marché européen, mais le second est développé dans certains pays riches en gaz naturel (Algérie). Le procédé de DRI avec de l'hydrogène renouvelable ou bas carbone est développé pour décarboner la production d'acier primaire. L'acier est aussi massivement recyclé en EAF en Europe.

Enjeux pour la réduction directe à l'hydrogène



Pilotage/Performance

La DRI-H2 est un procédé qui se développe avec des nouveaux projets à large échelle (100 - 1000 MW électrolyse) porté par des acteurs de la sidérurgie qui maîtrisent l'instrumentation du procédé DRI. La fourniture d'hydrogène doit donc s'intégrer à un **pilotage digitalisé** et moderne de procédé de grand volume. La taille des projets exige donc des **solutions de mesure digitalisées massives et intégrées.**



Fiabilité/Durabilité

L'enjeu majeur est le coût et la fiabilité d'approvisionnement ce qui induit pour les instruments une nécessité de grande durabilité, de fiabilité de fourniture sur toute l'année, ainsi que de la maintenance prédictive.

Exigences induites

Exigence H2 : Pur à 99,9% (grade B), Pressions faibles (<30 bars)

Enjeux matériaux des capteurs : Résistance à la corrosion (H2O), fragilisation sous l'hydrogène, usure mécanique et durabilité

Certifications : ATEX, ESP

Notes: 1) DRI = Direct Reduced Iron

Usages en chimie industrielle



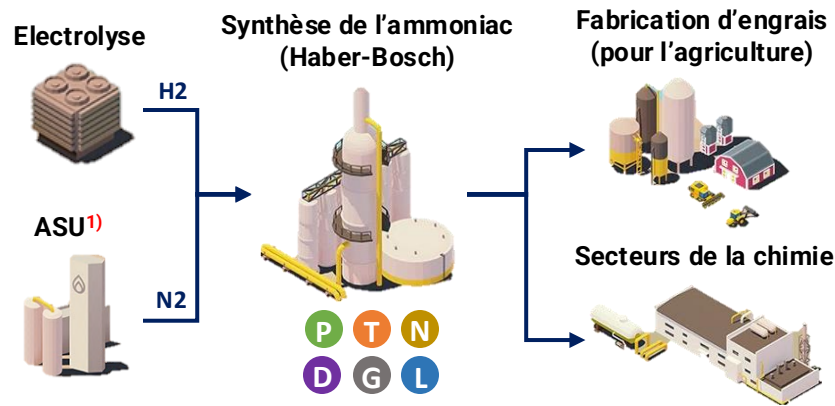
« Une instrumentation adaptée à des consommations très massives d'hydrogène »

L'hydrogène est une importante matière première de l'industrie pour :

- La **synthèse de l'ammoniac**, utilisé dans la fabrication d'engrais.
- La **synthèse du méthanol**, utilisé dans plusieurs secteurs de la chimie.
- L'**agroalimentaire**, pour l'hydrogénation des graisses.

L'hydrogène matière est également utilisé dans d'autres secteurs comme la parfumerie, la cosmétique ou la pharmaceutique...

Production et usages de l'ammoniac décarboné par l'hydrogène



LÉGENDE

- | | | |
|--------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| P Mesure de pression | G Analyse gaz | D Mesure de débit |
| T Mesure de température | L Analyse liquide | N Mesure de niveau |

La synthèse de l'ammoniac et la synthèse de méthanol sont les deux usages industriels, après la pétrochimie, les plus importants de l'hydrogène. Ils vont donc jouer un **rôle clé dans l'industrialisation de la filière hydrogène**.

- L'ammoniac une fois obtenu est pour l'essentiel (au moins 75%) employé dans **l'industrie des engrais**. La partie restante est utilisée dans les secteurs de la pharmaceutique, du textile, de la chimie fine et de la plasturgie.
- Le méthanol quant à lui sert d'antigel (liquide de refroidissement), de solvant, de carburant, comme dénaturant de l'alcool éthylique et permet également de produire du biodiesel.

L'instrumentation de ces deux applications est déjà en place et bien connue.

Enjeux pour la chimie industrielle



Pilotage/Performance

Les projets de production d'ammoniac et de méthanol représentent de très gros volumes et débits d'hydrogène. Un enjeu critique est donc l'optimisation du génie chimique à large échelle en mettant en œuvre un pilotage avec des solutions de **mesure digitalisées massives et intégrées**. L'instrumentation de la fourniture d'hydrogène doit donc s'intégrer au procédé avec un large panel de capteurs pour différents produits chimiques et en **conditions de température et de pression élevée selon le procédé**.



Sécurité

Les produits chimiques impliquent un enjeu majeur de sécurité relatif aux dangers spécifiques de produits azotés (AZF) et toxiques (méthanol) imposant des normes du génie chimique.

Exigences induites

Exigence H2 : Pur à 99,9% (grade B), mesure de gaz de 4 impuretés critiques

Enjeux matériaux des capteurs : Résistance à la corrosion, fragilisation sous l'hydrogène, perméation hydrogène, résistance à la haute température

Certifications : ATEX, ISO 14687, ISO 19880-8, Normes génie chimique et pétrolier, Métrologie légale

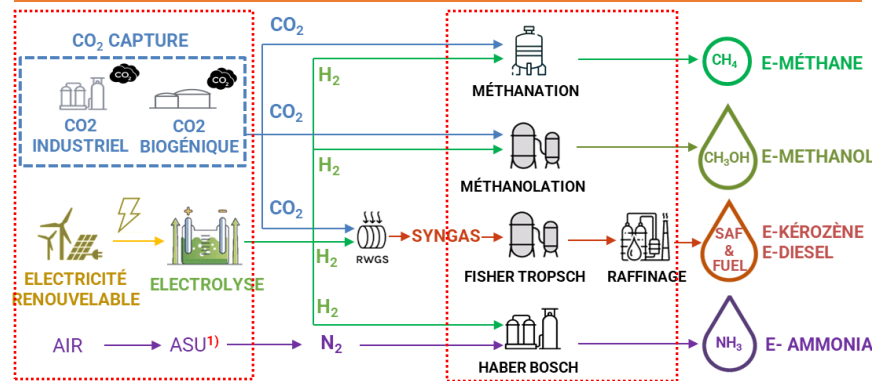
Les électro-carburants (e-fuels)



« Une instrumentation adaptée à des consommations très massives d'hydrogène »

Les e-carburants, comme l'e-méthane, l'e-kérosène et l'e-méthanol, sont des carburants sous forme gazeuse ou liquide produits à partir de CO₂ et d'hydrogène issu d'électricité renouvelable ou décarbonée. **La matière première électrolytique utilisée (électricité) les différencie des biocarburants (bio-fuels)**, qui sont principalement produits à partir de la biomasse.

Les e-fuels



LÉGENDE

- P** Mesure de pression
- G** Analyse gaz
- D** Mesure de débit
- T** Mesure de température
- L** Analyse liquide
- N** Mesure de niveau

Chaque électro-carburant présente des avantages qui lui sont propres :

- **E-méthane** : utilisation sous sa forme liquide GNL (gaz naturel liquéfié) ou sous forme gazeuse dans le transport maritime ou routier.
- **E-méthanol** : utilisation matière par les industriels de la chimie ou utilisation carburant pour le secteur maritime (solutions « dual-fuel » déjà déployées).
- **E-ammoniac** : utilisation matière pour la fabrication d'engrais, comme carburant dans le maritime ou comme vecteur de transport de l'hydrogène.
- **E-kérosène** : Le e-kérosène est destiné au transport aérien. Il fait partie des carburants durables pour l'aviation ou SAF (Sustainable Aviation Fuels).

Enjeux pour les électro-carburants



Pilotage/Performance

Les projets de production de e-fuels sont nouveaux et de production massive (50-500 MW électrolyse) ce qui induit de grandes dimensions. L'enjeu fort de ces molécules reste très proche de l'usage en chimie industrielle, c'est à dire l'optimisation des procédés chimiques à large échelle en mettant en œuvre un pilotage avec des solutions de **mesure digitalisées massives et intégrées**.



Sécurité

De la même manière, l'utilisation de produits chimiques implique un enjeu majeur de sécurité relatif aux dangers spécifiques de produits azotés (AZF) et toxiques (méthanol) imposant des normes proches du raffinage et génie chimique.

Exigences induites

Exigence H2 : 99,97% , Mesure de gaz de 14 impuretés critiques, Pression élevée selon le procédé

Enjeux matériaux des capteurs : Résistance à la corrosion, fragilisation sous l'hydrogène, perméation hydrogène, haute pression, haute température.

Certifications : ATEX, ISO 14687, ISO 19880-8, Normes génie chimique et pétrolier, Métrologie légale



La combustion industrielle hydrogène



« Une instrumentation adaptée à des sites industriels et de fortes puissances »

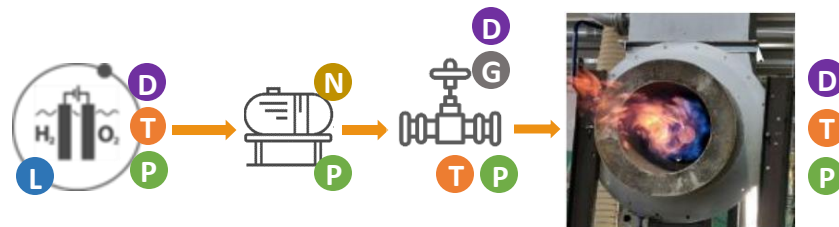
Solution rapidement diffusible de décarbonation par rétrofit des combustions de gaz fossiles pour les procédés thermiques :

- **Métaux** : Aciers, aluminium, cuivre, fonderie, forge, laminage ...
- **Minéraux** : Fusion du Verre, enrobés routiers, corindon, minéraux et sels ...
- **Organiques** : Papier, malt, brasserie, whisky, cuissons et agroalimentaire ...

Le passage à l'H₂ modifie les propriétés de combustion, de transfert thermique ainsi que la composition de l'atmosphère des fours. Un gros enjeu est la validation technique dans chaque procédé de l'impact sur les fours et les produits dans les nombreux secteurs concernés.

Les volumes en jeu sont immenses et la voie de fourniture d'hydrogène principale est la production sur site par électrolyse de 2 à 30 MW.

Combustion H₂



LÉGENDE

- | | | |
|--------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| P Mesure de pression | G Analyse gaz | D Mesure de débit |
| T Mesure de température | L Analyse liquide | N Mesure de niveau |

Selon l'Alliance Alice, sur les 240 TWh de chaleur industrielle non électrique en France, au maximum 29% seraient électrifiables. Le marché pour la combustion H₂ serait surtout dans les 147 TWh utilisés pour les fours à hautes températures et forte puissance en rétrofit. Le marché réel sera déterminé par les limites techniques, d'intégration au site ou réglementaires des autres voies de décarbonation.

Enjeux pour la combustion industrielle



Pilotage/Performance

Le pilotage des **débits d'alimentation des brûleurs en gaz** est critique pour la performance, l'efficacité de combustion, le contrôle de l'atmosphère du four et le respect des normes d'émission (surtout les NO_x). Cela concerne l'air et l'hydrogène mais aussi les carburants conventionnels (GPL ou GN) en mélange et l'oxygène en cas d'oxycombustion. De plus, la **métrologie légale** des gaz achetés suppose une mesure de température et pression pour normaliser le débit.



Réglementaire

La concentration de pollution (NO_x) est un ratio sur le volume de fumées après condensation. Mais l'oxycombustion H₂ génère essentiellement de la vapeur d'eau donc un volume nul après condensation ce qui rend la norme actuelle inapplicable et appelle son évolution.

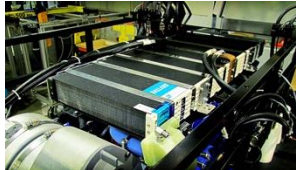
Exigences induites

Exigence H₂ : Pur à 99,9% (grade B), mesure de gaz de 4 impuretés critiques
Pression <30 bars

Enjeux matériaux des capteurs : Résistance à haute température, H₂ et H₂O.

Certifications : ATEX, ESP, **Métrologie légale**, Normes Pollution NO_x

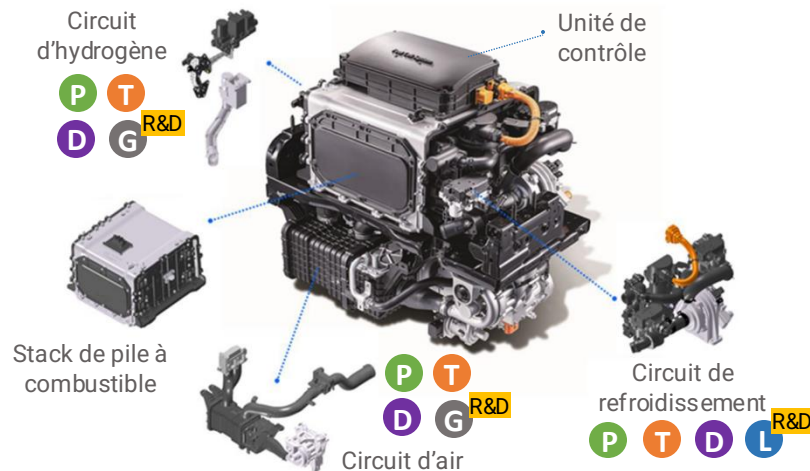
Usages piles à combustible



« Une instrumentation adaptée à l'environnement multi-fluidique et multi-physique »

La pile à combustible permet de convertir l'énergie chimique contenue dans l'hydrogène en énergie électrique. Le système pile à combustible PEM (plus mature) est utilisé pour deux types d'application : la mobilité hydrogène et le stationnaire (groupe électrogène, cogénération résidentielle, back-up unit).

Schéma système d'une pile à combustible (embarqué)



LÉGENDE

- P** Mesure de pression
- T** Mesure de température
- G** Analyse gaz
- L** Analyse liquide
- D** Mesure de débit

- **Circuit d'air** : au niveau de la cathode, l'air ambiant est d'abord comprimé, puis humidifié avant d'être acheminé vers la pile à combustible.
- **Circuit d'hydrogène** : au niveau de l'anode, l'hydrogène est fourni par un « hydrogen blower » qui contrôle le rendement de l'ensemble du système.
- **Circuit de refroidissement** : le circuit de refroidissement assure la dissipation de la chaleur et est nécessaire pour la capacité de démarrage à froid.
- **Circuit électrique** : une unité de contrôle commande permet de piloter l'ensemble du système.

Enjeux pour la pile à combustible



Pilotage/Performance

Le contrôle simultané des pressions, températures et débits assure le maintien des performances (efficacité, durabilité) et permet de **réduire les coûts énergétiques & de maintenance**.



Qualité d'hydrogène et d'eau

L'extrême sensibilité des piles à combustible PEM impose des exigences de **pureté de l'H2** mais également une **non-contamination des fluides** en jeu (poussières, résidus de la dégradation des matériaux, conductivité nulle de l'eau), ce qui peut nécessiter l'utilisation de plusieurs instruments analytiques.



Sécurité

Une instrumentation adaptée permet d'éviter l'accumulation importante de concentrations d'O2 dans le flux d'H2 (et vice-versa), la suppression et la surchauffe de la pile à combustible.

Exigences induites

Exigence H2 : 99,97% (mobilité), et mesure de gaz de 14 impuretés critiques
Enjeux matériaux des capteurs : corrosion, hydruration, fragilisation sous l'H2, perméation H2, haute pression, résistance à la vibration, tenue aux cycles de température, tenue mécanique et à la fatigue dans un environnement embarqué
Certifications : ATEX, MID-002, OIML r139, ISO 14687 (R&D)



PAC embarquée



PAC stationnaire



Principales réglementations à l'échelle européenne

Mobilité



Autres réglementations

Directives Européennes

Textes communs à tous les pays de l'UE mais chaque pays membre est libre d'élaborer ses propres tests à partir du texte européen

OIML r139 (remplace la EC79)	[International recommendation] Compressed gaseous fuel measuring systems for vehicles
ISO 23273	Fuel Cell Road Vehicle ; Safety Specification
EC79 and associated regulation rules (Arrivé à terme en Juillet 2023)	Commission Regulation (EU) No 406/2010 of 26 April 2010 implementing Regulation (EC) No 79/2009 of the European Parliament and of the Council on type-approval of hydrogen-powered motor vehicles
SAE J2601	Protocol and process limits for hydrogen fueling of vehicles
SAE J2578	Recommended Practice for General Fuel Cell Vehicle Safety
ISO 14687	Qualité du carburant hydrogène (mesure qualité H2 hors ligne)
ISO 19880-8	Contrôle qualité du carburant Hydrogène (mesure qualité H2 en ligne)

Caractère « volontaire » non obligatoire : Les pouvoirs publics peuvent rendre tout ou partie d'une norme d'application obligatoire, en prenant un texte réglementaire spécifique à cet effet

Directives Européennes

Textes communs à tous les pays de l'UE mais chaque pays membre est libre d'élaborer ses propres tests à partir du texte européen

Seveso - 2012/18/UE	Accidents industriels
IED - 2010/75/EU	Emissions industrielles
ATEX 2014/34/UE	Atmosphères Explosives
MID-002 2014/32/UE	Régit la mise sur le marché des instruments de mesure relevant de la métrologie légale.
MD - 2006/42/EC	Machines
PED-2014/68/UE TPED-1999/36/EC	Equipements sous pression stationnaires Equipements sous pression transportables
LVD - 2014/35/UE	Basses tensions
EMC - 2014/30/UE	Compatibilité électromagnétique
EIHP	Safety - Work Package 5

Le marquage CE atteste au final de la conformité de la station aux exigences de sécurité européennes (PED/TPED, ATEX, BT, CEM, RoHS-Reach)

Entreprises proposant des Solutions d'Instrumentation

Ce Livre Blanc présentait les enjeux d'instrumentation sur la chaîne de valeur de l'hydrogène pour six familles d'équipements :

→ Découvrez les solutions proposées par les **entreprises du GIMELEC** permettant d'y répondre : 14 de nos experts vous présentent leurs offres pour les six familles ci-contre. Cet annuaire vous permet également d'en savoir plus sur les entreprises du GIMELEC actives sur l'instrumentation pour l'hydrogène.

[Cliquez](#) pour accéder à l'annuaire GIMELEC



<p>Mesure de pression</p> <p>ABB EMERSON Endress+Hauser Fuji Electric GEORGIN JUMO Schneider Electric SIEMENS VEGA WIKAI</p> <p>PAGES 7-10</p>	<p>Mesure de température</p> <p>ABB EMERSON Endress+Hauser Fuji Electric GEORGIN JUMO Schneider Electric SIEMENS VEGA WIKAI</p> <p>PAGES 11-13</p>	<p>Mesure de débit</p> <p>ABB EMERSON Endress+Hauser Fuji Electric JUMO Schneider Electric SICK SIEMENS WIKAI</p> <p>PAGES 14-16</p>
<p>Analyse liquide</p> <p>EMERSON Endress+Hauser JUMO METTLER TOLEDO Schneider Electric</p> <p>PAGES 17-18</p>	<p>Analyse gaz</p> <p>ABB DURAG GROUP EMERSON Endress+Hauser envea Fuji Electric SICK SIEMENS</p> <p>PAGES 19-20</p>	<p>Mesure de niveau</p> <p>ABB EMERSON Endress+Hauser Fuji Electric JUMO SIEMENS VEGA WIKAI</p> <p>PAGES 22-24</p>

→ Pour les offreurs de solutions sur l'ensemble de la chaîne de valeur de l'hydrogène (production – stockage – transport – distribution – usages) : retrouvez en ligne le [Panorama des Solutions H₂](#) proposé par France Hydrogène

→ Retrouvez également sur l'observatoire de l'hydrogène [Vig'hy](#), l'annuaire en ligne des **membres de France Hydrogène** : 450 acteurs de la filière française de l'hydrogène structurés sur l'ensemble de la chaîne de valeur : grands groupes industriels, PME-PMI, start-ups, laboratoires et centres de recherche, associations, pôles de compétitivité et collectivités territoriales.