Tenerrdis

PRHyUS – Best practices exchange

06/10/2026



Valentin Maillot
06/10/2026

Table des matières

Introduction générale et contexte de l'événement 3
1. Présentation de Tenerrdis : Rôle, gouvernance et écosystème hydrogène régional 3
2. Le rôle des Régions à Bruxelles et la stratégie d'influence (Plaidoyer) 4
Synthèse 6
Session 1 : Interregional Exchange 6
1. Décarbonation de l'industrie cimentière et chaîne de valeur du CO2 (Julien Poillot, Groupe Vicat) 6
1.1. Profil industriel, ancrage historique et structure des émissions du Groupe Vicat 6
1.2. Les leviers historiques d'atténuation, d'efficacité et de substitution 7
1.3. Du projet initial HYNOVI au projet structurant VAIA et logistique du CO2 7
1.4. Valorisation du CO2 et ruptures technologiques de fabrication par oxycombustion 8
2. R&D de pointe et infrastructures pour la filière hydrogène (Julie Mougin, CEA-Liten) 8
2.1. Organisation, positionnement et ancrage institutionnel du CEA-Liten 8
2.2. Maîtrise des technologies de conversion et d'électrolyse 9
2.3. Outils de modélisation multi-échelles et plateformes de caractérisation avancée 9
2.4. Essaimage industriel et projets européens structurants 10
3. L'industrialisation de l'électrolyse à haute température SOEC (Patrice Tochon, Genvia) 10
3.1. Genèse, gouvernance et architecture du partenariat public-privé 10
3.2. Avantages thermodynamiques, cinétiques et valorisation de la chaleur fatale 10
3.3. Déploiement industriel, cas d'usage et intégration future 11
Session 2 : Interregional Exchange 12
1. La décarbonation de l'industrie chimique : le projet eM-Rhône (Elyse Energy) 12
1.1. Genèse, vision stratégique et positionnement des fondateurs 12
1.2. Analyse macro-économique et géopolitique 12
1.3. Analyse détaillée du site d'implantation : La plateforme intégrée de Roches-Roussillon (GIE Osiris) 13
1.4. Dimensionnement technique et technologique de l'unité de production d'e-méthanol 13
1.5. Stratégie d'approvisionnement électrique : Contrats à long terme et allocation nucléaire 14
1.6. Chaîne d'approvisionnement et logistique du dioxyde de carbone (Captage cryogénique et transport ferroviaire) 14

1.7. Modèle économique, financements institutionnels et garanties Bpifrance 14
2. Déployer l'infrastructure hydrogène pour améliorer la flexibilité du système énergétique (HYFEN / HYPSTER) 15
2.1. Le déploiement des infrastructures de transport d'hydrogène : le projet HYFEN 15
2.2 Le stockage souterrain géologique et la flexibilité des réseaux : le projet HYPSTER (Storengy) 17
2.3. Analyse technico-économique de la flexibilité du système électrique et gazier 18
2.4. Cadre réglementaire européen, certification et critères RFNBO 19
3. Une approche de Michelin 3 étoiles pour la mobilité hydrogène (Atawey) 20
3.1. Développement de la société Atawey 20
3.2. Étude de cas : la station de Cournon-d'Auvergne (Hympulsion) 21
4.1. Ingénierie du déploiement : la méthodologie des 4 piliers d'Atawey 22
5. Retours d'expérience terrain, aléas et cadre réglementaire 24
Audit Energétique : Projet IMAGHYNE et modélisation territoriale (CEA / Tenerrdis) 25
1. Stratégie et architecture du projet européen IMAGHYNE 25
1.1. Périmètre d'action et chaîne de valeur intégrée 25
1.2. Activités de prospective et modélisation technico-économique 26
2. Synthèse de la consultation des parties prenantes (stakeholders vision) 26
2.1. Inquiétudes majeures, freins et verrous d'investissement 26
2.2. Cartographie des opportunités sectorielles prioritaires 26
3. Modélisation technico-économique multi-vecteurs : la plateforme CAIRN Open 27
3.1. Architecture mathématique et fonctionnalités technologiques 27
3.2. Analyse des scénarios d'évaluation IMAGHyNE (2030 et 2040) 27
Conclusion et messages-clés 28

Introduction générale et contexte de l'événement

Le 6 octobre 2026 se tenait, dans le cadre du projet européen PRHyUS (Interreg Europe), un événement d'échange de meilleures pratiques régionales dédié à la filière hydrogène. Cette rencontre avait pour ambition de dresser un panorama complet de l'état d'avancement des projets en région Auvergne-Rhône-Alpes, d'analyser les perspectives de développement pour les années à venir et de consolider les synergies territoriales et européennes.

La journée s'est articulée autour de trois temps forts. Une session introductive a d'abord présenté le rôle moteur du pôle de compétitivité Tenerrdis — qui fédère 78 membres hydrogène et a labellisé 43 projets représentant 147 millions d'euros — ainsi que la stratégie d'influence de la Région Auvergne-Rhône-Alpes à Bruxelles, active au sein des principales alliances européennes de l'hydrogène. Les sessions d'échanges interrégionaux ont ensuite donné la parole aux acteurs de terrain de l'ensemble de la chaîne de valeur : décarbonation de l'industrie lourde (Groupe Vicat), recherche de pointe (CEA-Liten), industrialisation de l'électrolyse haute température (Genvia), carburants de synthèse (Elyse Energy), infrastructures de transport et de stockage (NaTran, Storengy), mobilité lourde (Atawey) et modélisation territoriale (projet IMAGHyNE, plateforme CAIRN Open).

1. Présentation de Tenerrdis : Rôle, gouvernance et écosystème hydrogène régional

Intervenants : Pauline Bonino, Yohann Croizat (Délégué général) et Estelle Périnel (Cheffe de projet innovation).

Historique et positionnement : Fondé en 2005 et certifié par l'État, le pôle de compétitivité Tenerrdis est ancré en région Auvergne-Rhône-Alpes et s'impose comme un acteur de premier plan vers la neutralité carbone à l'horizon 2050. L'approche ne se limite pas aux aspects climatiques stricts, mais intègre l'innovation, la croissance économique, la création d'emplois durables et le renforcement de la résilience industrielle des territoires.

Missions clés :

1. Soutien aux projets d'innovation des membres (en particulier les PME et ETI) par la mise en relation avec des partenaires adaptés.
2. Accompagnement dans la recherche de financements et le montage de projets.
3. Suivi technique et opérationnel lors du déploiement des projets.
4. Animation du réseau et facilitation des rencontres d'affaires.
5. Promotion nationale et internationale des technologies et des solutions des membres.

Gouvernance et réseau : Le pôle rassemble environ 250 à 280 membres couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur de la transition énergétique (universités, centres de recherche, agences

publiques, start-ups, ETI et grands groupes). Concernant spécifiquement l'hydrogène, Tenerrdis fédère 78 membres impliqués, dont plus de 20 acteurs purs (pure players) et utilisateurs finaux.

Bilan des projets soutenus : Depuis plus de 10 ans, Tenerrdis travaille en étroite collaboration avec le Conseil régional d'Auvergne-Rhône-Alpes sur la stratégie hydrogène régionale. Le pôle a labellisé et soutenu 43 projets stricts liés à l'hydrogène, représentant une valeur totale de 147 millions d'euros, incluant 44 millions d'euros de fonds publics.

Exemples de projets phares :

Inocel : Accompagnement sur les piles à combustible de forte puissance pour applications stationnaires et industrielles (bénéficiant notamment du Fonds pour une Transition Juste).

Mantle8 : Soutien sur les solutions d'exploration d'hydrogène naturel (blanc).

ZEV (Zero Emission Valley) : Écosystème régional de mobilité hydrogène visant un déploiement massif incluant 11 stations de ravitaillement, 40 véhicules légers et 40 véhicules lourds à l'horizon 2026.

IMAGHyNE : Vaste projet de vallée hydrogène à l'échelle régionale, lauréat de l'appel à projets 2023 du Clean Hydrogen Partnership (coordonné par la Région pour la période 2024–2029), couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur (production, stockage, distribution, usages finaux) et articulé avec les réseaux européens (Partenariat S3 H2 Valleys).

Accompagnement des territoires : Tenerrdis aide les collectivités locales (comme le Département de Savoie, le SIEL 42 ou la Communauté de communes du Pays d'Évian Vallée d'Abondance - CCPEVA) à identifier les cas d'usage pertinents. À titre d'exemple, l'expérimentation AMETHySTA a permis de tester un bus et un car à hydrogène sur deux lignes quotidiennes pendant 15 jours à l'aide d'une station de ravitaillement mobile.

Compétences et formation : Suite à une enquête régionale menée en 2020 avec le Campus des Métiers et des Qualifications (Smart Energy Systems Campus), Tenerrdis collabore activement avec l'Université Grenoble Alpes (UGA) et le programme AMHY pour structurer des offres de formation adaptées aux besoins de recrutement de la filière (ingénieurs et techniciens).

2. Le rôle des Régions à Bruxelles et la stratégie d'influence (Plaidoyer)

Intervenante : Jeanne Fabreguettes (Délégation de la Région Auvergne-Rhône-Alpes à Bruxelles).

Missions de la Délégation à Bruxelles : Rattachée à la Direction générale de l'Économie, de l'Innovation, des Compétences et de l'International, l'antenne bruxelloise compte une petite équipe de six personnes (dont quatre chargés de mission thématiques). Elle accueille également dans ses locaux d'autres entités régionales telles que la Métropole de Lyon, Grenoble Alpes Métropole et l'Université Grenoble Alpes. Ses missions reposent sur trois piliers :

1. Informer et assurer une veille réglementaire active sur les dossiers européens en cours de négociation.

2. Soutenir les acteurs régionaux dans leurs démarches européennes (accès aux financements, visites institutionnelles, portage de projets).
3. Représenter la Région au sein de réseaux, alliances et initiatives paneuropéennes.

Pourquoi les Régions s'engagent-elles à Bruxelles ?

Enjeux financiers : Gestion des fonds de cohésion (FEDER, FSE+, Interreg, FEADER) et des programmes sectoriels gérés directement à Bruxelles (Horizon Europe, Mécanisme pour l'interconnexion en Europe - MIE, Fonds Innovation). L'enjeu majeur actuel est la préparation et l'influence sur le prochain cadre financier pluriannuel (MFF 2028-2034) et le futur Fonds de compétitivité européenne.

Enjeux réglementaires : De nombreuses compétences partagées entre l'UE et les régions impactent directement les politiques locales (économie, industrie, recherche, innovation, compétences, énergie, transport, environnement).

Implication dans les réseaux et alliances stratégiques :

- Partenariat européen des vallées hydrogène (European Hydrogen Valleys Partnership) : La Région y exerce les rôles de coordinatrice, de vice-présidente et de membre du groupe de pilotage (rassemblant 67 autorités régionales et locales) pour faciliter les échanges de bonnes pratiques, le montage de consortiums et le plaidoyer.
- ERRIN (European Regions Research and Innovation Network) : Leadership du groupe de travail « Énergie et transition propre », permettant de porter la voix des autorités publiques sur la transition énergétique et l'hydrogène.
- Alliance européenne pour un hydrogène propre (European Clean Hydrogen Alliance) : Membre du comité de pilotage (géré par la DG GROW de la Commission européenne), apportant l'éclairage des pouvoirs publics sur le déploiement industriel.
- Partenariat pour un hydrogène propre (Clean Hydrogen Partnership - CHP) : Vice-présidence et participation au groupe des parties prenantes (Stakeholder Group), qui agit en tant qu'organe consultatif auprès de cette entreprise commune public-privé pour orienter les appels à propositions.
- Méthodologie du plaidoyer (Advocacy) : La stratégie s'adapte à la procédure législative ordinaire (Commission européenne, Conseil de l'UE et Parlement européen). Les outils mobilisés comprennent les consultations publiques, les réunions de travail, les prises de position (position papers), les courriers ciblés, les amendements et l'organisation d'événements publics.

Exemples concrets de dossiers suivis :

1. Révision du règlement sur le déploiement d'infrastructures pour carburants rechange (AFIR) : Suivi de la viabilité économique des stations de ravitaillement. La région plaide pour le maintien d'objectifs ambitieux malgré les pressions visant à les affaiblir, soulignant que la lenteur du déploiement des flottes de véhicules pénalise l'équilibre économique des stations existantes (comme dans le projet ZEV). Participation active au groupe d'experts de

la DG MOVE (Sustainable Transport Forum) et contributions aux consultations publiques de 2025-2026.

2. Avenir des entreprises communes (Joint Undertakings), dont le CHP : Veille active et réponses aux consultations de la Commission pour garantir le maintien des structures de soutien dédiées aux vallées hydrogène et éviter une dilution des financements.

Échanges et questions/réponses : Une intervention de Nicola Di Giulio a souligné les débats européens autour de la directive sur les énergies renouvelables (RED III) et la définition stricte des carburants renouvelables d'origine non biologique (RFNBO). Jeanne Fabreguettes a précisé que cet aspect fait l'objet de démarches politiques ciblées au niveau national (notamment via un courrier de l'Exécutif régional au ministre français compétent), tout en rappelant la position constante de la Région en faveur de la prise en compte de l'hydrogène bas-carbone (incluant l'électricité d'origine nucléaire).

Synthèse

Cette session introductive a permis de démontrer l'articulation étroite entre les réalisations opérationnelles de terrain menées en Auvergne-Rhône-Alpes (portées par Tenerrdis, les industriels, les laboratoires et les collectivités) et la stratégie d'influence politique menée au niveau européen par la Délégation régionale. La coordination entre l'innovation locale, le déploiement d'infrastructures (vallées hydrogène) et le portage d'une voix unie à Bruxelles constitue un facteur clé de succès pour pérenniser la position de leader de la région dans la transition énergétique.

Session 1 : Interregional Exchange

1. Décarbonation de l'industrie cimentière et chaîne de valeur du CO2 (Julien Poillot, Groupe Vicat)

1.1. Profil industriel, ancrage historique et structure des émissions du Groupe Vicat

Le Groupe Vicat, entreprise industrielle familiale fondée il y a plus de deux cents ans à la suite de l'invention du ciment artificiel par Louis Vicat, axe son modèle d'affaires sur la fabrication de matériaux de construction essentiels à l'aménagement des territoires, à savoir le ciment, les granulats et le béton. La production de ciment repose sur un procédé pyrotechnique lourd consistant à cuire un mélange cru finement broyé, composé principalement de calcaire et d'argile, dans des fours rotatifs à très haute température (atteignant 1450 °C) pour obtenir du clinker, constituant de base indispensable et réactif du liant hydraulique.

Sur le plan environnemental et dans le cadre de la comptabilisation des gaz à effet de serre, les émissions directes de dioxyde de carbone de type Scope 1 inhérentes à cette industrie lourde se caractérisent par une double origine structurelle :

- Un tiers des émissions énergétiques : Cette fraction découle de la combustion des combustibles nécessaires pour alimenter les brûleurs du four, élever la température de la matière première et opérer la fusion partielle menant à la clinkérisation.
- Deux tiers des émissions de processus : Cette fraction majeure est directement liée à la calcination chimique de la matière première elle-même. Lors de la cuisson, le carbonate de calcium subit une dissociation thermique irréversible pour se transformer en oxyde de calcium et en dioxyde de carbone. Il s'agit d'un flux de dioxyde de carbone de processus physico-chimique intrinsèque à la transformation minérale, inévitable quelle que soit la source d'énergie thermique employée.

1.2. Les leviers historiques d'atténuation, d'efficacité et de substitution

Face à l'urgence climatique et aux trajectoires fixées par les accords internationaux, le Groupe Vicat déploie depuis de nombreuses décennies une stratégie globale d'atténuation structurée autour de plusieurs piliers technologiques complémentaires :

1. L'optimisation de l'efficacité énergétique des installations : Modernisation continue des échangeurs thermiques à cyclones, amélioration des profils d'isolation des fours rotatifs, récupération interne des calories et optimisation des rendements des moteurs et broyeurs électriques.
2. L'utilisation maximale de combustibles de substitution : Remplacement progressif et intensif des combustibles fossiles traditionnels par des combustibles solides de récupération issus du tri de déchets industriels et municipaux non recyclables, permettant d'atteindre sur certains fours des taux de substitution très élevés, voire totaux.
3. La diminution du ratio de clinker : Réduction de la proportion de clinker dans les ciments commercialisés par l'incorporation d'ajouts minéraux bas-carbone, visant à baisser substantiellement l'empreinte carbone intrinsèque par tonne de ciment produite.
4. La reconnaissance de l'impératif du captage et du stockage : L'analyse prospective menée par le groupe démontre que malgré l'ensemble des optimisations possibles sur le ratio de clinker et l'efficacité thermique, des émissions résiduelles substantielles persisteront inévitablement au niveau des cheminées des cimenteries en raison du dioxyde de carbone de calcination. Le recours à des technologies de captage, transport et stockage ou valorisation s'avère donc indispensable pour atteindre la neutralité carbone.

1.3. Du projet initial HYNOVI au projet structurant VAIA et logistique du CO2

Dans sa trajectoire d'innovation, le projet initialement développé sur le site de la cimenterie de Montalieu-Vercieu en portant la désignation HYNOVI a connu une réorientation stratégique majeure pour évoluer vers le projet industriel d'envergure baptisé VAIA.

- L'ambition du projet VAIA : Capter massivement les flux de dioxyde de carbone émis par la cimenterie afin d'éviter leur rejet dans l'atmosphère, transformant ainsi un site industriel lourd en pionnier de la neutralité carbone régionale et nationale.
- La chaîne logistique et le rétrofit du pipeline : Le projet s'appuie sur une infrastructure logistique remarquable consistant à rétrofiter un pipeline d'hydrocarbures existant, long de plusieurs centaines de kilomètres et d'un diamètre métrique, autrefois dédié aux produits pétroliers, pour l'affecter au transport massifié du dioxyde de carbone liquéfié vers des exutoires de stockage géologique permanent ou des plateformes de valorisation maritime.
- Défis opérationnels et réglementaires : Le calendrier de déploiement se heurte à la complexité des procédures d'enquêtes publiques, à l'obtention des autorisations environnementales coordonnées entre partenaires industriels, et à la visibilité à long terme des cadres réglementaires européens, notamment les règles régissant les carburants renouvelables et le mécanisme d'ajustement carbone aux frontières. L'objectif de mise en service industrielle vise la fin de la décennie.

1.4. Valorisation du CO2 et ruptures technologiques de fabrication par oxycombustion

Pour maximiser l'impact de la capture, Vicat explore les synergies entre le dioxyde de carbone capté et l'hydrogène bas-carbone pour synthétiser des carburants de synthèse et des intermédiaires chimiques à haute valeur ajoutée. La synthèse de e-fuel à horizon 2050 nécessite 80 TWh d'électricité, soit 10 GW (l'équivalent de 10 réacteurs nucléaires) et 10 MtCO2/an, ce qui représente plus que les émissions de toutes les cimenteries françaises.

En parallèle, le groupe investit dans des ruptures technologiques de fabrication par le biais de consortiums de recherche européens. L'approche d'oxycombustion consiste à substituer l'air de combustion du four par un flux d'oxygène pur. Cette technique modifie radicalement la composition des gaz d'échappement en éliminant l'azote, ce qui génère un flux de gaz hautement concentré en dioxyde de carbone directement exploitable sans nécessiter d'étapes de séparation post-combustion lourdes et énergivores, abaissant ainsi significativement le coût global de la chaîne de capture.

2. R&D de pointe et infrastructures pour la filière hydrogène (Julie Mougin, CEA-Liten)

2.1. Organisation, positionnement et ancrage institutionnel du CEA-Liten

Le Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives est un organisme public de recherche à fort impact technologique, doté de vastes ressources humaines et financières et reconnu de longue date comme un acteur majeur du dépôt de brevets en Europe. Au sein de la Direction de la Recherche Technologique du CEA, l'institut Liten constitue le pôle de référence national et européen en matière de transition énergétique.

Le Liten est directement rattaché à la direction des énergies du CEA et déploie ses activités scientifiques et technologiques sur deux grands centres majeurs situés à Grenoble et au Bourget-du-Lac. Sa mission fondamentale consiste à concevoir, développer et porter à un niveau de maturité industrielle des briques technologiques de rupture destinées aux filières de l'énergie de demain, en agissant comme un pont essentiel entre la recherche académique fondamentale et l'industrie manufacturière de pointe.

2.2. Maîtrise des technologies de conversion et d'électrolyse

Le CEA-Liten couvre l'intégralité du continuum technologique de l'hydrogène, de la formulation chimique des matériaux élémentaires jusqu'à l'intégration et au test de systèmes complexes à l'échelle pilote :

- L'électrolyse de l'eau : Le laboratoire mène des programmes de recherche avancés sur plusieurs technologies d'électrolyse complémentaires. Outre les filières matures, un accent particulier est mis sur l'électrolyse à membrane échangeuse d'anions, qui associe les avantages de fonctionnement des milieux alcalins et la compacité des membranes polymères, ainsi que sur l'électrolyse à haute température à oxydes solides. Des travaux exploratoires sont également menés sur la photoélectrocatalyse.
- Les systèmes de conversion : Le CEA développe des compétences de premier plan sur les piles à combustible à membrane échangeuse de protons pour les applications de mobilité lourde, maritime et stationnaire, ainsi que sur les piles à oxydes solides fonctionnant en mode réversible.
- Le stockage et le transport : La recherche intègre également le développement de réservoirs haute pression innovants en matériaux composites, de solutions de stockage à l'état solide et de vecteurs organiques liquides de transport d'hydrogène.

2.3. Outils de modélisation multi-échelles et plateformes de caractérisation avancée

La crédibilité et la puissance d'innovation du CEA-Liten reposent sur des plateformes expérimentales et de calcul numérique de classe mondiale :

- Bancs d'essais et plateaux techniques : Le centre dispose de nombreux bancs de test hautement instrumentés dédiés au vieillissement accéléré, à la caractérisation sous conditions réelles et à l'optimisation des performances des cellules d'électrolyse et des piles à combustible.
- Modélisation multiphysique : Des outils de simulation avancés couvrent toutes les échelles spatiales et temporelles, depuis la cinétique des réactions électrochimiques à l'échelle nanométrique au cœur des catalyseurs jusqu'au comportement dynamique des grands systèmes industriels couplés aux réseaux énergétiques complexes.

- Grandes infrastructures de recherche : L'accès privilégié à des installations de rayonnement synchrotron de classe internationale et à des sources neutroniques de pointe situées à proximité immédiate permet d'analyser en conditions réelles la structure intime des matériaux sous tension électrochimique, offrant des clés de compréhension uniques sur les mécanismes fins de dégradation et d'usure.

2.4. Essaimage industriel et projets européens structurants

- Transfert technologique et essaimage : Le CEA illustre sa capacité à transformer l'innovation de laboratoire en succès industriels par la création de start-ups technologiques de rupture. À titre d'exemple, le savoir-faire acquis sur les piles à combustible a permis l'émergence d'acteurs industriels majeurs comme Inocel, fabricant de systèmes de forte puissance pour les applications maritimes et stationnaires, qui poursuit une collaboration étroite de recherche avec le centre.
- Le projet européen ACTHYVE : Présenté comme une initiative structurante pour l'écosystème, ce projet européen vise à interconnecter et cartographier l'ensemble des infrastructures technologiques de la chaîne de valeur de l'hydrogène propre à l'échelle du continent. Il fournit à la Commission européenne des analyses d'adéquation entre l'offre de services technologiques et les besoins industriels, tout en contribuant à lever les barrières réglementaires et financières au déploiement des filières.

3. L'industrialisation de l'électrolyse à haute température SOEC (Patrice Tochon, Genvia)

3.1. Genèse, gouvernance et architecture du partenariat public-privé

Genvia incarne un modèle original de partenariat technologique et industriel fondé en mars 2021, fruit de la conjugaison de plus de vingt ans de recherche fondamentale et appliquée menée au sein du CEA et de l'expertise industrielle de groupes internationaux de premier plan tels que SLB, aux côtés de partenaires régionaux et industriels majeurs comme le Groupe Vicat, Vinci Construction et l'Agence Régionale Energie Climat Occitanie.

L'entreprise déploie ses équipes pluridisciplinaires sur plusieurs sites stratégiques en France : son siège et son usine pilote de fabrication implantés à Béziers, son centre de recherche et de caractérisation ancré à Grenoble en étroite synergie avec les laboratoires du CEA, et ses équipes d'ingénierie et de développement basées en région parisienne.

3.2. Avantages thermodynamiques, cinétiques et valorisation de la chaleur fatale

La technologie de rupture portée par Genvia repose sur l'électrolyse de l'eau à haute température fonctionnant par cellule à oxyde solide, exploitant des plages thermiques comprises entre 700 °C et 800 °C :

- Le principe thermodynamique : L'électrolyseur est alimenté non pas sous forme d'eau liquide, mais de vapeur d'eau surchauffée. Sur le plan thermodynamique, l'apport de chaleur à haute température réduit l'exigence en énergie électrique pure nécessaire pour rompre la liaison chimique de la molécule d'eau par rapport aux procédés à basse température.
- Gain d'efficacité énergétique : Alors que les technologies conventionnelles requièrent de l'ordre de 50 à 55 kWh d'électricité par kilogramme d'hydrogène produit, l'utilisation de la technologie à oxydes solides développée par Genvia permet de réduire la consommation d'électricité à environ 39 kWh électriques par kilogramme, le complément énergétique indispensable étant apporté sous forme thermique par la valorisation de la chaleur fatale disponible sur les sites industriels. Cela représente un gain d'efficacité de conversion globale de l'ordre de 30% par rapport aux filières classiques.
- Avantages environnementaux des matériaux : Les cellules à oxydes solides développées par Genvia se distinguent par l'absence totale de métaux précieux du groupe du platine et par une conception exempte de composés per- et polyfluoroalkylés, levant ainsi des contraintes critiques d'approvisionnement en matières premières stratégiques et garantissant une durabilité accrue.

3.3. Déploiement industriel, cas d'usage et intégration future

- Première génération de systèmes : Des systèmes modulaires de démonstration d'une capacité de l'ordre de 200 kg d'hydrogène par jour font l'objet de déploiements pilotes sur des sites industriels exigeants. C'est le cas notamment du projet mené sur le site sidérurgique d'ArcelorMittal, où l'électrolyseur valorise la chaleur fatale des fours pour produire de l'hydrogène décarboné destiné à remplacer l'hydrogène fossile utilisé dans les procédés métallurgiques.
- Génération industrielle : Genvia industrialise des briques modulaires de forte puissance conçues pour être assemblées en grands ensembles adaptés aux exigences des industriels grands consommateurs d'hydrogène et de carburants de synthèse. Une intégration majeure de cette technologie est d'ores et déjà planifiée pour s'interfacer avec les utilités thermiques et les besoins de la cimenterie du Groupe Vicat.
- Synergies avec le secteur aéronautique : Des études technico-économiques approfondies menées en collaboration avec des acteurs majeurs de l'aviation ont démontré que l'intégration de l'électrolyse à haute température permet de réduire significativement le coût actualisé du kérosène de synthèse, renforçant la compétitivité économique de la filière aéronautique durable face aux exigences réglementaires européennes.

Session 2 : Interregional Exchange

1. La décarbonation de l'industrie chimique : le projet eM-Rhône (Elyse Energy)

1.1. Genèse, vision stratégique et positionnement des fondateurs

Fondée en 2020 par des entrepreneurs chevronnés issus des secteurs de l'énergie et des infrastructures (ayant développé et investi plus de 5 milliards d'euros dans les énergies renouvelables à travers le solaire, l'éolien et le biométhane), l'entreprise Elyse Energy s'est imposée comme un pure player de référence européenne dans la production de carburants de synthèse et de molécules bas-carbone. Forte de plus de 80 collaborateurs hautement spécialisés et ayant sécurisé plus de 600 millions d'euros de financements publics et privés cumulés, Elyse Energy développe un portefeuille de projets d'envergure visant une production globale d'environ 1 million d'tonnes d'e-carburants par an. Parmi ces projets figurent l'e-méthanol avec eM-Rhône en France, l'e-bioSAF avec BioTJet, l'e-biométhanol avec Numancia en Espagne, ainsi que des plateformes logistiques et de production intégrées.

1.2. Analyse macro-économique et géopolitique

La transition énergétique mondiale du XXIe siècle se caractérise par un changement de paradigme fondamental : l'avènement progressif de l'électricité comme vecteur énergétique universel et dominant, succédant au pétrole et au gaz du XXe siècle, et au charbon du XIXe siècle. L'économie mondiale s'électrifie à un rythme soutenu, la part de l'électricité dans la demande énergétique finale s'établissant à environ 23 %, tout en entraînant une augmentation drastique des besoins globaux en énergie propre.

Cette dynamique de transition ne repose pas sur une solution unique, mais sur une architecture duale et complémentaire :

1. L'électrification directe : Elle couvre de 40 % à 60 % des besoins énergétiques mondiaux, englobant la mobilité électrique (véhicules légers et utilitaires à batterie), le secteur résidentiel et tertiaire (pompes à chaleur et efficacité thermique) ainsi qu'une partie des procédés industriels basse et moyenne température (fourneaux et chaudières électriques). C'est la voie la plus efficiente sur le plan thermodynamique.
2. L'électrification indirecte (les raffineries électriques) : Pour les secteurs dits hard-to-abate (difficiles à décarboner par simple raccordement électrique, tels que l'aviation long-courrier, le transport maritime international, la pétrochimie lourde et la production de matériaux critiques), l'électrification directe est inopérante. Il est impératif de recourir à l'électrification indirecte à travers la production de molécules de synthèse (e-fuels). Ces raffineries électriques combinent l'électricité renouvelable ou bas-carbone, l'eau, et du dioxyde de carbone (capté sur des rejets industriels ou issu de la biomasse) pour

synthétiser des vecteurs énergétiques liquides ou gazeux chimiquement identiques aux combustibles fossiles qu'ils remplacent.

Sur le plan géopolitique, l'analyse comparée des grands blocs économiques révèle des trajectoires contrastées. La Chine mène une accélération fulgurante dans le domaine des carburants verts (e-fuels et e-biofuels), affichant plus de 31 % de son énergie finale d'origine électrique et disposant d'unités industrielles d'e-biométhanol et d'hydrogène déjà pleinement opérationnelles. En Europe, et de manière privilégiée en France et dans la péninsule ibérique (Espagne et Portugal), un fenêtrage d'opportunité stratégique s'ouvre. La France bénéficie d'un mix électrique structurellement excédentaire et décarboné à plus de 95 %, combinant le parc électronucléaire historique et l'essor des énergies renouvelables. En 2025, la France a ainsi exporté près de 92,3 TWh d'électricité excédentaire vers ses voisins européens, tout en traversant des périodes d'abondance marquée caractérisées par des volumes importants de curtailment (bridages et effacements de production renouvelable, atteignant 33 TWh) et une récurrence accrue d'heures à prix négatifs sur les bourses de l'électricité (marchés spot). Cette configuration offre aux industriels des conditions d'approvisionnement en électrons compétitives, à condition de structurer des mécanismes d'indexation et des contrats de long terme adaptés.

1.3. Analyse détaillée du site d'implantation : La plateforme intégrée de Roches-Roussillon (GIE Osiris)

Le projet eM-Rhône constitue le fleuron de la feuille de route industrielle d'Elyse Energy, avec un jalon critique de décision finale d'investissement planifié pour la fin de l'année 2026. L'implantation a été choisie après une analyse multicritère rigoureuse : le site est hébergé au sein de la plateforme chimique intégrée du GIE Osiris à Roches-Roussillon, située dans la vallée du Rhône au sud de Vienne (Isère). Cette plateforme offre des avantages concurrentiels majeurs :

- Un écosystème industriel mature doté de compétences pointues en génie chimique et en gestion des risques industriels sévères (statut Seveso seuil haut).
- Des synergies d'utilités optimisées (partage des réseaux d'eau industrielle, de vapeur, de traitement des effluents et des installations de torche).
- Une culture de sécurité ancrée de longue date et des infrastructures logistiques multimodales de tout premier plan, incluant un accès direct au réseau ferré national, aux axes autoroutiers structurants et à la voie fluviale du Rhône (connexion directe aux ports de la Méditerranée).

1.4. Dimensionnement technique et technologique de l'unité de production d'e-méthanol

Sur le plan technique, eM-Rhône est conçu pour produire 150 000 tonnes d'e-méthanol par an, destinées en priorité aux armateurs du transport maritime mondial engagés dans la décarbonation de leurs flottes, ainsi qu'aux industriels de la chimie fine et des matériaux plastiques bas-carbone. Le cœur du réacteur technologique repose sur :

- Une unité d'électrolyse de l'eau de grande puissance d'une capacité nominale de 200 MW, permettant de générer massivement de l'hydrogène renouvelable et bas-carbone de haute pureté.
- Un réacteur de synthèse catalytique du méthanol combinant l'hydrogène produit par électrolyse et le dioxyde de carbone capté, mettant en œuvre des catalyseurs hétérogènes avancés sous haute pression et température contrôlée.

1.5. Stratégie d'approvisionnement électrique : Contrats à long terme et allocation nucléaire

La viabilité économique d'un projet d'électrolyse de 200 MW dépend directement de la prédictibilité et de la compétitivité du coût de l'électricité sur une longue période. Pour s'affranchir de la volatilité erratique des marchés spot européens, Elyse Energy a structuré une stratégie d'approvisionnement novatrice consistant à négocier des contrats d'achat d'électricité à long terme d'une durée supérieure à 10 ans adossés à des accords d'allocation d'énergie nucléaire bas-carbone négociés avec EDF. Cette sécurisation garantit un facteur de charge élevé et prévisible pour les électrolyseurs, optimisant ainsi le coût actualisé de l'hydrogène.

1.6. Chaîne d'approvisionnement et logistique du dioxyde de carbone (Captage cryogénique et transport ferroviaire)

La production d'e-méthanol nécessite l'intégration d'un flux massif et stable de dioxyde de carbone de haute pureté. Pour eM-Rhône, l'approvisionnement en CO_2 repose sur un partenariat stratégique avec l'usine de cimenterie Lafarge située à environ 100 kilomètres plus au sud, dans le département de l'Ardèche. Les procédés mis en œuvre comprennent :

- L'installation d'une unité de captage industriel utilisant des technologies de pointe (lavage aux amines ou séparation cryogénique) permettant de capter et de purifier un flux annuel de 214 000 tonnes de CO_2.
- L'acheminement massifié et sécurisé de ce dioxyde liquidé ou comprimé par trains complets empruntant les voies ferrées existantes de la vallée du Rhône directement jusqu'aux emprises de la plateforme d'Osiris, évitant ainsi le recours au transport routier et minimisant l'empreinte carbone globale de la chaîne logistique.

1.7. Modèle économique, financements institutionnels et garanties Bpifrance

Le montage financier d'eM-Rhône illustre la complexité et l'ambition des grands projets industriels de transition en Europe. Le projet a su mobiliser un ensemble inédit de leviers de financement publics et privés :

- Lauréat du Fonds Innovation de l'Union Européenne, bénéficiant d'une subvention directe en capital de 115 millions d'euros, saluant le caractère hautement innovant et l'exemplarité environnementale du projet en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- Bénéficiaire du Mécanisme de Soutien à l'Hydrogène Français, assurant une couverture partielle des coûts opérationnels sur une période de 10 ans pour compenser l'écart de prix entre les e-carburants et les combustibles fossiles conventionnels.
- Obtention d'une garantie de projet stratégique accordée par l'État français par l'intermédiaire de Bpifrance, facilitant la levée de la dette bancaire auprès d'un consortium de banques commerciales européennes de premier plan.

2. Déployer l'infrastructure hydrogène pour améliorer la flexibilité du système énergétique (HYFEN / HYPSTER)

2.1. Le déploiement des infrastructures de transport d'hydrogène : le projet HYFEN

Vision stratégique et architecture européenne des réseaux de transport en accès ouvert

Oumou Ly, représentant le gestionnaire de réseau de transport NaTran, a exposé la vision directrice du déploiement des infrastructures gazières dédiées à l'hydrogène en France et en Europe. Le développement de la filière hydrogène ne peut reposer sur des îlots de production et de consommation isolés ; il exige la création d'une dorsale nationale et transfrontalière interconnectée. La stratégie nationale de NaTran s'articule autour de trois piliers fondamentaux :

1. Le développement de réseaux de transport d'hydrogène en accès ouvert, garantissant la non-discrimination des utilisateurs, connectant les grands bassins industriels français (Fos-sur-Mer et l'étang de Berre, la vallée du Rhône, la région dunkerquoise et le Grand-Est).
2. L'extension progressive du maillage territorial pour relier de manière fluide les sites de production massive, les pôles de consommation industrielle et les infrastructures de stockage souterrain géologique.
3. Le renforcement des interconnexions européennes à travers le corridor paneuropéen H2Med, favorisant l'émergence d'un marché unifié de l'hydrogène en Europe.

Tracé géographique, périmètre technique et régions traversées (Corridor Sud-Nord)

Le projet HyFEN représente l'un des plus grands chantiers d'infrastructure d'hydrogène gazeux en cours de développement à l'échelle du continent européen. Sur le plan technique et géographique, ses caractéristiques incluent :

- Un réseau de transport linéaire d'environ 820 kilomètres de canalisations neuves en acier hautement résistant, spécifiquement conçues, revêtues et certifiées pour le transport d'hydrogène pur sous haute pression.

- Un tracé stratégique reliant le grand port maritime et industriel de Fos-sur-Mer en région Provence-Alpes-Côte d'Azur jusqu'à la commune d'Erching en Moselle, à la frontière franco-allemande.
- Une traversée de cinq régions françaises majeures, irriguant les bassins de consommation industrielle intermédiaires et se connectant aux grands flux européens.

Chronologie détaillée des phases d'ingénierie, FEED et perspectives de mise en service à l'horizon 2032

Le calendrier de déploiement d'un projet d'infrastructure d'une telle envergure s'étale sur plus d'une décennie et obéit à des processus réglementaires rigoureux :

- 2024-2025 : Réalisation des phases de pré-étude et organisation des appels à manifestation d'intérêt auprès des industriels producteurs et consommateurs pour valider l'appétence du marché.
- 2025-2028 : Déploiement des études d'ingénierie détaillées, des levés topographiques, géotechniques et des enquêtes d'utilité publique, menant aux procédures d'autorisation administrative et environnementale.
- 2029-2030 : Décision finale d'investissement de la part des actionnaires et gestionnaires, suivie de l'attribution des marchés de construction et de la délivrance des permis de construire.
- 2030-2032 : Phases de travaux de génie civil, de soudure, de contrôle non destructif et de mise en eau et de pression des canalisations, pour une mise en service opérationnelle ciblée en 2032.

Concertation publique, acceptabilité territoriale et intégration environnementale

Conscient des enjeux d'acceptabilité locale inhérents aux grands projets d'infrastructures linéaires, NaTran a mené une vaste concertation publique encadrée du 28 septembre au 20 décembre. Cette démarche transparente a inclus l'organisation de dizaines de réunions publiques locales, d'ateliers thématiques et de webinaires interactifs permettant aux riverains, aux associations de protection de l'environnement, aux collectivités territoriales et aux exploitants agricoles de dialoguer avec les ingénieurs. Les retours de cette concertation ont permis d'ajuster finement les fuseaux de tracé pour éviter les zones écologiques sensibles, préserver les terres agricoles à haute valeur agronomique et minimiser les nuisances temporaires pendant les phases de chantier.

2.2 Le stockage souterrain géologique et la flexibilité des réseaux : le projet HYPSTER (Storengy)

Le rôle central du stockage souterrain en cavités salines face à l'intermittence des EnR

Florent Lejette, Directeur du développement commercial chez Storengy, a démontré lors de son intervention que le transport par canalisation ne constitue qu'un maillon de la chaîne : il doit impérativement être adossé à des capacités de stockage géologique massif. L'industrie gazière européenne possède une expertise séculaire, exploitant déjà plus de 900 TWh de stockage souterrain de gaz naturel. Cependant, pour l'hydrogène, les exigences physiques et chimiques diffèrent radicalement. En raison de la petite taille de sa molécule, de sa forte diffusivité et de sa réactivité, le stockage en aquifères ou en gisements épuisés s'avère complexe. La solution technologique la plus performante et la plus sûre est le stockage géologique en cavités salines creusées dans d'épais gisements de sel gemme. Storengy développe à ce titre un portefeuille de projets structurants en France :

- Le projet Geo2 sur le cluster industriel de Fos-sur-Mer, s'appuyant sur des cavités salines mises en saumure, avec une mise en service programmée entre 2032 et 2033.
- Le projet Etrez, situé près de Lyon, mobilisant des cavités salines existantes et adaptables à court et moyen termes pour sécuriser l'approvisionnement de l'écosystème rhodaniens.
- Le projet Storzen dans le Grand-Est, inscrit à un horizon plus lointain et nécessitant le creusement de nouvelles cavités par lixiviation contrôlée dans des formations salines profondes.

Enseignements technologiques et opérationnels du projet pilote Hypster

Achevé en 2025 et cofinancé par l'Union européenne dans le cadre du partenariat pour l'hydrogène propre, le projet Hypster constitue le tout premier pilote européen de stockage souterrain d'hydrogène en cavité saline artificielle. Les enseignements majeurs retirés de sa phase de construction, de tests et d'exploitation pilote sont riches d'enseignements pour la filière :

- La pré-qualification rigoureuse des équipements : La qualification ne relève pas d'un simple label marketing mais exige des protocoles de test drastiques sur site. Les essais en conditions réelles ont validé des cahiers des charges extrêmement stricts concernant la métallurgie des têtes de puits, l'étanchéité des vannes, les garnitures d'étanchéité et les systèmes de canalisations pour contrer toute fuite liée à la faible viscosité de l'hydrogène.

Étude des performances dynamiques, des cycles rapides de pression et de l'intégrité géomécanique

Le projet Hypster a notamment permis de réaliser plus de 100 cycles complets d'injection et de soutirage d'hydrogène sous des variations de pression extrêmes oscillant entre une pression minimale de sécurité et 150 bars. Les conclusions géomécaniques et dynamiques sont formelles :

- Intégrité absolue de la cavité saline : Les analyses fines par imagerie géophysique et les bilans massiques ont démontré l'absence totale de fuite ou de percolation d'hydrogène à travers la roche encaissant la cavité.
- Stabilité géomécanique du sel : Contrairement aux craintes initiales, le sel gemme encaisse parfaitement les contraintes induites par les cycles rapides de variation de pression sans dégradation structurale ni fluage dommageable.
- Robustesse des équipements de surface : Les vannes de régulation, les compresseurs spécifiques et les unités de séchage ont fonctionné de manière nominale sous un régime de sollicitations dynamiques intenses.

Panorama des projets de stockage en France (Geo2, Etrez, Storzen)

Ces projets s'inscrivent dans une logique de planification territoriale cohérente. Alors que le projet Etrez offre une capacité d'agilité immédiate pour la région Auvergne-Rhône-Alpes et le couloir rhodanien, le projet Geo2 consolidera le pôle industrialo-portuaire méditerranéen de Fos-sur-Mer, et Storzen anticipera les besoins futurs du grand corridor européen d'importation et de transit vers l'Allemagne.

2.3. Analyse technico-économique de la flexibilité du système électrique et gazier

Quantification macro-économique des bénéfices sociétaux

Plusieurs études techno-économiques prospectives de référence évaluent avec précision la valeur économique créée par l'intégration des infrastructures hydrogène. Le bénéfice net sociétal apporté par la flexibilité combinée des réseaux maillés et du stockage souterrain est estimé entre 1,2 milliard et 1,5 milliard d'euros par an à l'horizon 2035-2050.

Valorisation de l'électricité fatale et atténuation du phénomène de curtailment

En 2025, la France a comptabilisé près de 33 TWh d'électricité d'origine renouvelable et nucléaire modulée qui ont dû être perdus en raison d'une inadéquation temporaire entre une production surabondante et une demande nationale insuffisante, couplée à la saturation des interconnexions transfrontalières. Le couplage des électrolyseurs de grande puissance avec des infrastructures de stockage souterrain permet d'absorber cette électricité fatale lors des pics de production, transformant une perte économique sèche en un vecteur énergétique stockable et valorisable.

Résilience face aux épisodes climatiques extrêmes et aux périodes de Dunkelflaute

Les systèmes électriques hautement renouvelables sont intrinsèquement vulnérables aux épisodes dits de Dunkelflaute, qui correspondent à des périodes hivernales prolongées conjuguant une absence totale de vent et un ensoleillement quasi nul, pouvant s'étendre sur plus d'une semaine. Lors de tels épisodes, la production éolienne et solaire s'effondre simultanément tandis que la demande de chauffage atteint son paroxysme. Le stockage souterrain massif d'hydrogène constitue l'ultime assurance-vie du système énergétique : l'hydrogène stocké peut être restitué pour alimenter des turbines à gaz à hydrogène ou des piles à combustible de forte puissance,

garantissant la sécurité d'approvisionnement des industriels sans réémettre de gaz à effet de serre.

Optimisation paramétrique du coût actualisé de l'hydrogène par le couplage transport-stockage

Les modélisations paramétriques présentées démontrent que l'optimisation économique de la filière repose sur la mutualisation des infrastructures. Le raccordement d'un électrolyseur à une infrastructure de stockage souterrain partagée située à moins de 100 à 200 kilomètres, à l'instar du site d'Etrez pour la région Rhône-Alpes, permet d'abaisser le coût actualisé de production de l'hydrogène de près de 0,9 €/kg H_2, soit une réduction d'environ 18 % par rapport à un fonctionnement en mode isolé ou en bande continue pure. Cette baisse des coûts est le catalyseur indispensable pour atteindre la parité économique avec l'hydrogène gris fossile.

2.4. Cadre réglementaire européen, certification et critères RFNBO

Transposition des directives européennes et paquet gaz/décarbonation

L'essor de la filière hydrogène et des carburants de synthèse s'inscrit dans un cadre législatif européen en pleine mutation, structuré notamment par le Paquet Gaz et Décarbonation adopté par l'Union Européenne en 2024. Ce corpus législatif établit les règles régissant l'unification des marchés de l'hydrogène, l'accès tiers aux réseaux, la séparation des activités des gestionnaires de transport et de stockage, ainsi que la fixation des tarifs régulés d'acheminement. La transposition en droit national de ces directives constitue un chantier réglementaire majeur pour les États membres afin d'offrir la visibilité juridique nécessaire aux investisseurs institutionnels.

Traçabilité horaire, géographique et exigences strictes des actes délégués RFNBO

L'un des sujets les plus débattus lors de la session concerne l'application des critères rigoureux édictés par les Actes Délégués de la Directive Européenne sur les Énergies Renouvelables concernant les carburants renouvelables d'origine non biologique. Ces textes imposent une triple exigence de traçabilité :

- L'additionnalité : L'électricité consommée par l'électrolyseur doit provenir d'installations de production renouvelable nouvellement construites, évitant ainsi de cannibaliser les énergies renouvelables existantes qui alimentent déjà le réseau général.
- La corrélation géographique : L'électrolyseur et la source de production d'électricité renouvelable doivent être situés dans la même zone de prix de marché.
- La corrélation temporelle : À compter de 2030, la correspondance entre la production d'électricité renouvelable et son utilisation par l'électrolyseur devra être assurée à l'échelle horaire stricte.

Arbitrages entre électricité renouvelable et électricité nucléaire bas-carbone

Ces critères stricts soumettent les porteurs de projets à des arbitrages complexes. En France, la spécificité du mix électrique bas-carbone fortement nucléarisé suscite des discussions nourries avec les autorités européennes. Alors que les textes privilégient l'origine strictement renouvelable, les acteurs industriels français et les autorités régionales plaident pour la reconnaissance de l'électricité bas-carbone d'origine nucléaire, essentielle pour garantir une compétitivité industrielle

pérenne et éviter des surcoûts artificiels préjudiciables à la souveraineté européenne face à la concurrence internationale.

3. Une approche de Michelin 3 étoiles pour la mobilité hydrogène (Atawey)

3.1. Développement de la société Atawey

Historique, capacités industrielles et ancrage régional

Atawey s'impose comme l'un des leaders français et européens dans la conception, la fabrication, l'installation et la maintenance de stations de recharge en hydrogène (HRS - *Hydrogen Refueling Stations*) ainsi que d'infrastructures de remplissage pour conteneurs mobiles de transport (*Tube-Trailers*).

- **Ancrage industriel et territorial :** L'entreprise a implanté son centre névralgique et son usine principale d'assemblage et d'ingénierie à Grenoble, au cœur du pôle d'innovation d'Auvergne-Rhône-Alpes. Cet ancrage territorial favorise des synergies directes avec l'écosystème scientifique et industriel régional.
- **Capacités opérationnelles et effectifs :** Forte d'une trajectoire de croissance continue soutenue par plus de 15 années d'expertise accumulée dans la chaîne de valeur de l'hydrogène, Atawey emploie aujourd'hui plus de 75 collaborateurs hautement qualifiés (ingénieurs en thermodynamique, spécialistes en mécanique des fluides, techniciens d'automatisme et d'exploitation).
- **Parc installé et rayonnement international :** À ce jour, la société compte à son actif plus de 50 stations de recharge déployées et mises en service opérationnel à travers plus de 10 pays, couvrant un spectre large allant des stations de mobilité légère aux infrastructures à très grande capacité pour véhicules lourds.

Positionnement stratégique et proposition de valeur

Atawey ne se positionne pas uniquement comme un simple équipementier ou fournisseur de matériel (*hardware*), mais comme un intégrateur de solutions globales assurant un accompagnement de bout en bout (*end-to-end*) :

- Ingénierie de dimensionnement sur-mesure adaptée aux profils de soutirage des flottes.
- Prise en charge des démarches administratives, réglementaires et d'autorisation d'exploiter (procédures ICPE).
- Supervision télémétrique en temps réel et gestion automatisée de la maintenance préventive et curative.
- Garantie d'un taux de disponibilité élevé, indispensable pour les opérateurs de transport public et de logistique soumis à des contraintes d'exploitation strictes.

3.2. Étude de cas : la station de Cournon-d'Auvergne (Hympulsion)

La station hydrogène de Cournon-d'Auvergne, située dans le département du Puy-de-Dôme, constitue l'une des réalisations les plus emblématiques du réseau régional HYmpulsion. Elle fait figure de vitrine technologique nationale pour la distribution d'hydrogène à haut niveau de service pour la mobilité lourde.

Métriques d'exploitation et performances de distribution

- **Capacité nominale et maximale :** La station est dimensionnée pour délivrer jusqu'à **1 500 kg (1,5 tonne) d'hydrogène par jour**, ce qui la classe parmi les stations de plus forte capacité actuellement en exploitation en Europe continentale.
- **Typologie de la flotte desservie :** La station alimente quotidiennement un noyau dur d'environ **20 véhicules lourds**, principalement constitués de bus de transport urbain exploités par le réseau Keolis Clermont-Ferrand (recharge sous une pression de 350 bar) et d'autocars de lignes interurbaines (recharge sous une pression de 700 bar).
- **Bilan cumulé depuis la mise en service :**
    - Plus de **50 000 kg (50 tonnes)** d'hydrogène bas carbone distribués avec succès.
    - Plus de **4 500 opérations de ravitaillement** effectuées en conditions réelles d'exploitation routière et urbaine.

Analyse détaillée de la saisonnalité et profilage des volumes

L'analyse des données de distribution mensuelle de la station de Cournon-d'Auvergne révèle des enseignements majeurs sur le comportement de la demande et l'impact des facteurs externes sur l'exploitation :

- **Profil moyen :** En régime de croisière, la distribution mensuelle s'établit dans une fourchette comprise entre **4 000 kg/mois et 5 600 kg/mois**.
- **Avril :** Volume distribué de **4 304 kg**. Cette baisse ponctuelle s'explique par la forte concentration de jours fériés et de ponts durant ce mois, entraînant une réduction temporaire des fréquences de circulation des transports interurbains et scolaires.
- **Mai et Juin :** Pics de consommation annuelle enregistrés à **5 615 kg** (mai) et **5 597 kg** (juin). Ces volumes reflètent une utilisation maximale de la flotte d'autocars et de bus en période d'activité économique et touristique soutenue.
- **Juillet :** Chute significative des volumes à **2 520 kg**. Cette baisse marquée résulte de deux facteurs conjugués :
    1. L'allègement estival traditionnel des grilles d'horaires de transport public suite aux vacances scolaires.
    2. L'exécution programmée de travaux d'ingénierie et de rétrofit technique sur le système de ventilation et de traitement d'air de la station, ayant nécessité des fenêtres de mise en arrêt temporaire.

4.1. Ingénierie du déploiement : la méthodologie des 4 piliers d'Atawey

Pour garantir le succès technologique et la viabilité financière d'un projet de station hydrogène, Atawey a formalisé une méthodologie rigoureuse structurée en quatre piliers fondamentaux. Geoffroy Ville illustre cette approche en dressant une analogie explicite avec le niveau d'exigence, de coordination et d'exécution requis dans la cuisine d'un grand restaurant trois étoiles au Guide Michelin.

Pilier 1 : Qualification fine de la demande ("Who's coming to dinner?")

La première cause d'échec ou de sous-performance financière d'une station réside dans une mauvaise évaluation du profil réel de consommation des véhicules. Atawey impose une catégorisation stricte de la demande selon trois niveaux de maturité commerciale décroissants :

2. **Demand Identified (Demande Identifiée) :** Représente les intentions d'achat ou les manifestations d'intérêt théoriques exprimées par des collectivités ou des transporteurs. Ce niveau présente une volatilité élevée et ne doit en aucun cas servir de base unique au dimensionnement de l'investissement.
3. **Demand Committed (Demande Engagée) :** Correspond aux volumes associés à des commandes fermes de véhicules, des contrats de délégation de service public attribués ou des engagements contractuels d'enlèvement d'hydrogène (*take-or-pay*). C'est ce volume qui détermine le CAPEX initial de la station.
4. **Actual Consumption (Consommation Réelle) :** Quantités effectivement mesurées et soutirées à la borne. L'objectif de l'ingénierie est de réduire au maximum l'écart entre la demande engagée et la consommation réelle dès les premiers mois d'exploitation.

Typologie d'implantation géographique :

- *Corridors AFIR (Alternative Fuels Infrastructure Regulation) :* Stations publiques à très grande capacité implantées le long des grands axes autoroutiers transeuropéens pour desservir le transit poids lourds longue distance.
- *Nœuds logistiques et plateformes intermodales :* Stations stratégiques situées à proximité immédiate des zones d'activités logistiques, des centres de tri et des entrepôts de distribution du dernier kilomètre.
- *Dépôts privés de captivité :* Stations dédiées installées au sein même des centres d'exploitation des transporteurs (dépôts de bus urbains ou de bennes à ordures ménagères).

Pilier 2 : Modèle d'approvisionnement et viabilité économique ("What ingredients?")

L'équation économique de l'hydrogène délivré à la pompe est extrêmement sensible à la chaîne logistique amont. Geoffroy Ville s'appuie sur les analyses de la *Global Hydrogen Mobility Alliance* pour établir les règles d'or de la rentabilité :

- **Format de transport par Tube-Trailer :** L'approvisionnement le plus compétitif pour des stations de distribution moyenne et grande capacité repose sur l'utilisation de conteneurs mobiles d'une capacité minimale de **1 tonne d'hydrogène comprimé (à une pression de 300 bar ou 500 bar)**.
- **Impact de la capacité du trailer :** Passer d'un format de livraison de 300 kg par trailer à un format de 1 000 kg (1 tonne) permet de **diviser par 3 le coût logistique d'acheminement par kilogramme d'hydrogène**.
- **Impact de la distance logistique :** Pour préserver l'équilibre économique de la station, la distance routière entre le site de production d'hydrogène par électrolyse et la station ne doit pas excéder **300 km**. Porter cette distance à 800 km dégrade dramatiquement le bilan carbone global et détruit la rentabilité du modèle d'affaires en raison du surcoût de transport routier.
- **Impact du taux d'utilisation (*Capacity Factor*) :** Pour une station d'une capacité nominale d'1 tonne par jour, le taux de charge est le levier majeur de baisse du coût unitaire. **Passer d'un taux d'utilisation de 30 % à un taux de 60 % réduit de 50 % la part fixe du coût d'infrastructure**, ce qui se traduit par une baisse directe de **~3 € par kg d'hydrogène distribué à la pompe**.

Pilier 3 : Architecture technique, procédés et équipements ("How to prepare the kitchen?")

Pour garantir un temps de remplissages des poids lourds de 10 à 15 minutes (conforme aux exigences de temps de rotation des transporteurs routiers), l'ingénierie d'Atawey intègre des sous-systèmes techniques de haute précision :

- **Système de gestion thermique et *Free Cooling* :** La détente rapide de l'hydrogène lors du remplissage génère un échauffement du réservoir embarqué du véhicule. Pour respecter les limites de température imposées par les normes de sécurité (ISO 19880-1), la station doit pré-refroidir le gaz à -40°C (catégorie T40). Atawey a développé un système de *Free Cooling* optimisé et synchronisé dynamiquement avec les cycles d'appels de charge des véhicules, réduisant la consommation électrique spécifique du groupe froid.
- **Architecture de compression, Bypass et Switches automatiques :** La station s'appuie sur un étagement de compression haute pression. L'intégration de lignes de bypass et d'automates de permutation (*switches*) permet de distribuer l'hydrogène en cascade directement depuis le stock tampon haute pression vers le véhicule, réduisant le travail mécanique exigé des compresseurs et maximisant le débit instantané lors des pics de fréquentation du matin.
- **Stockage fixe intermédiaire :** La station de Cournon-d'Auvergne comprend un stock tampon fixe au sol constitué de capacités en acier de Type 1 supportant des pressions de service de 500 bar et 1 000 bar.
- **Métrologie légale et comptage commercial :** Intégration de débitmètres massiques à effet Coriolis certifiés MIK (Métrologie Légale) garantissant une précision de mesure irréprochable pour la vente commerciale d'hydrogène au kilo.

Pilier 4 : Gouvernance, organisation et triptyque d'acteurs ("Who does what?")

Un projet de mobilité hydrogène lourde réunit des métiers profondément différents. Le succès repose sur une clarification stricte des périmètres de responsabilité au sein d'un triptyque opérationnel :

1. **Keolis (*Front-of-house Manager*) :** Opérateur de transport public. Il gère l'exploitation de la flotte de bus et cars, établit les plannings de passage à la station, forme les conducteurs aux gestes de ravitaillement et remonte les contraintes terrain.
2. **HYmpulsion (*Head Chef*) :** Société d'investissement et d'exploitation régionale réunissant la Région Auvergne-Rhône-Alpes, Michelin, Engie, le Crédit Agricole et la Banque des Territoires. HYmpulsion est le propriétaire d'actifs, le porteur du réseau régional (visant 15 à 16 stations) et le garant de la viabilité financière globale.
3. **Atawey (*Sous-Chef*) :** Fournisseur de la solution technologique et maître d'œuvre industriel. Atawey conçoit la station, supervise son assemblage, assure le suivi télémétrique continu 24/7 et déploie les équipes de maintenance préventive et curative.

5. Retours d'expérience terrain, aléas et cadre réglementaire

Analyse et résolution des aléas techniques en exploitation

L'exploitation en conditions réelles d'une station à fort débit fait émerger des défis techniques impératifs à résoudre :

- **Phénomène de givrage du pistolet (*Nozzle freezing*) :** Lors de distributions successives à des températures de gaz de -40°C, l'humidité atmosphérique présente dans l'air ambiant peut condenser et geler instantanément sur les composants mécaniques du pistolet de remplissage (*nozzle*), bloquant le verrouillage ou le déverrouillage du connecteur sur le véhicule. *Solution apportée :* Atawey a intégré un système de purge automatique à l'air comprimé sec balayant le connecteur immédiatement après chaque cycle de charge pour chasser toute trace d'humidité.
- **Gestion de la chaîne logistique des trailers :** Risque de rupture d'approvisionnement en cas de retard de rotation des conteneurs mobiles. *Solution apportée :* Mise en place d'une plateforme de télémesure connectée en temps réel mesurant la pression résiduelle du trailer connecté et déclenchant automatiquement l'ordre d'acheminement du trailer de remplacement auprès du logisticien.
- **Interopérabilité des protocoles de communication IRDA (Véhicule-Station) :** Des incohérences de dialogue entre les calculateurs de bord de certains constructeurs de véhicules (OEM) et l'automate de la station provoquaient des mises en sécurité intempestives et bridaient la vitesse de remplissage. Atawey a mené des campagnes de tests d'interopérabilité pour standardiser les échanges infrarouges (IRDA).

Analyse comparative du Permitting (ICPE) et perspectives technologiques

- **Procédures d'autorisation administrative (ICPE) :** En France, le déploiement des stations hydrogène est encadré par la réglementation des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (rubrique 4715). Geoffroy Ville souligne que le cadre français, bien que rigoureux, offre une grande clarté juridique. Les périmètres de sécurité imposés autour des équipements fixes (compresseurs, stockages) s'établissent généralement entre **8 mètres et 12 mètres**. Ce cadre réglementaire est jugé nettement plus pragmatique et favorable au déploiement opérationnel que celui en vigueur en Italie, où les exigences d'éloignement s'avèrent parfois bloquantes en milieu urbain dense.
- **Perspectives relatives à l'Hydrogène Liquide (LH2) :** Interrogé sur l'éventualité d'une transition vers la distribution d'hydrogène liquide à la pompe pour augmenter la densité énergétique embarquée, Geoffroy Ville indique **ne pas anticiper de déploiement commercial massif de l'hydrogène liquide en station au cours de la prochaine décennie**. Les contraintes liées à la gestion des pertes thermiques (*boil-off*), aux exigences cryogéniques extrêmes (-253°C) et à la complexité des équipements de station représentent des barrières économiques et techniques considérables par rapport à la maturité et à la fiabilité éprouvée des solutions sous pression gazeuse (350 bar et 700 bar).

Audit Energétique : Projet IMAGHYNE et modélisation territoriale (CEA / Tenerrdis)

Intervenants : Estelle Périnel (Tenerrdis) & Florent Montignac (Ingénieur Chercheur, CEA Liten)

1. Stratégie et architecture du projet européen IMAGHYNE

Le projet **IMAGHyNE** (*Auvergne-Rhône-Alpes Renewable Hydrogen Economy*) s'inscrit dans la dynamique européenne des *Hydrogen Valleys* destinées à faire émerger des écosystèmes territoriaux complets et intégrés d'hydrogène renouvelable.

1.1. Périmètre d'action et chaîne de valeur intégrée

IMAGHyNE couvre la totalité des maillons de la filière hydrogène régionale :

- **Production :** Implantation d'unités d'électrolyse de grande puissance alimentées par des sources d'électricité renouvelable et bas carbone.
- **Stockage massif :** Développement de solutions de stockage géologique à grande échelle en cavités salines (notamment sur le site d'Etrez) pour assurer le lissage inter-saisonnier.
- **Transport et logistique :** Structuration de réseaux de transport par pipelines régionaux et optimisation de la distribution routière par *Tube-Trailers*.
- **Usages finaux :** Décarbonation simultanée de la mobilité lourde et intensive (bus, cars, camions, bennes à ordures) et des procédés industriels consommateurs d'hydrogène.

1.2. Activités de prospective et modélisation technico-économique

Au-delà du déploiement physique des infrastructures, le projet IMAGHyNE intègre un volet majeur d'études prospectives confié au CEA et au pôle de compétitivité Tenerrdis. Ce volet vise à élaborer des modèles mathématiques rigoureux permettant de planifier la trajectoire d'investissement optimale aux horizons **2030** et **2040**.

2. Synthèse de la consultation des parties prenantes (stakeholders vision)

Entre juin et septembre 2025, une campagne d'entretiens individuels approfondis a été menée par Tenerrdis auprès de **20 acteurs majeurs** représentant l'ensemble de l'écosystème régional (producteurs d'énergie, gestionnaires de réseaux de transport, industriels consommateurs, collectivités territoriales et équipementiers).

2.1. Inquiétudes majeures, freins et verrous d'investissement

1. **Incertitude sur les volumes de demande à long terme :** Les acteurs industriels et les collectivités expriment une forte prudence. La demande future reste très sensible aux évolutions du cadre réglementaire européen, à la volatilité des prix de l'électricité du réseau et au surcoût des véhicules ou électrolyseurs.
2. **Concurrence accrue des technologies alternatives :** L'hydrogène n'est pas la seule solution de décarbonation. Il subit une compétition directe de l'électrification directe par batteries (dont les performances thermiques et d'autonomie progressent sur les poids lourds) et du biométhane/biogaz pour les flottes de transports territoriaux.
3. **Le blocage de l'investissement (*Poules et Œuf*) :** Les développeurs de stockages géologiques, de réseaux de gazoducs et de stations de recharge refusent de valider la décision finale d'investissement (FID) en l'absence d'engagements contractuels fermes à long terme (*take-or-pay*) de la part des consommateurs d'hydrogène. Réciproquement, les consommateurs refusent de commander des flottes sans garantie ferme sur la disponibilité et le prix de l'hydrogène.

2.2. Cartographie des opportunités sectorielles prioritaires

- **Industrie lourde :** La priorité immédiate réside dans le remplacement de l'hydrogène gris d'origine fossile (issu du reformage de gaz naturel) déjà utilisé de manière massive dans le secteur du **raffinage pétrolier** et de la **chimie de base**.
- **E-Fuels et Carburants de synthèse :** Fort potentiel identifié pour la synthèse de **SAF (*Sustainable Aviation Fuel*)** destinés au secteur aéronautique et d'**e-méthanol** pour le transport maritime. Ces molécules nécessitent la combinaison d'hydrogène bas carbone massif et de CO2 capté sur des sites industriels (*Carbon Capture and Utilization - CCU*).
- **Mobilité spécialisée à haute intensité :** Émergence de marchés de niche stratégiques où l'électrification sur batterie montre ses limites : les **bennes à ordures ménagères (BOM)**

nécessitant une puissance continue pour l'impactions des déchets, et les **engins de chantier/BTP** soumis à des cycles de travail sévères en zones isolées.

3. Modélisation technico-économique multi-vecteurs : la plateforme CAIRN Open

Pour éclairer les choix publics et privés d'investissement et dimensionner les infrastructures optimales, Florent Montignac (CEA Liten) a présenté la plateforme de modélisation **CAIRN Open**.

3.1. Architecture mathématique et fonctionnalités technologiques

- **Optimisation par programmation linéaire en variables mixtes (MILP) :** CAIRN Open n'est pas un simple outil de simulation, mais un optimiseur mathématique. Il résout des problèmes complexes en déterminant simultanément la combinaison optimale d'équipements à installer (*CAPEX*) et la stratégie de pilotage heure par heure (*OPEX*) sur une année complète (8 760 heures).
- **Approche multi-vecteurs intégrée :** Le logiciel modélise les interactions dynamiques entre les différents vecteurs énergétiques : électricité, chaleur, gaz naturel, biogaz et hydrogène.
- **Interface et ergonomie :** CAIRN Open dispose d'une interface graphique moderne en *Drag and Drop*, d'une API Python pour les calculs poussés, et d'un module d'interface avec les Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour cartographier physiquement les flux d'hydrogène sur le territoire régional.

3.2. Analyse des scénarios d'évaluation IMAGHyNE (2030 et 2040)

Scénario Horizon 2030 (Court et Moyen Terme)

Ce scénario vise à évaluer la viabilité de l'écosystème à l'échéance du projet IMAGHyNE :

- **Arbitrage du sourcing électrique :** Comparaison de l'impact économique entre des électrolyseurs connectés à des parcs renouvelables locaux intermittents (éolien, solaire) et des électrolyseurs alimentés via des contrats PPA (*Power Purchase Agreement*) adossés au mix électrique réseau bas carbone français.
- **Rôle de l'Hydrogène Gris comme "Backup" :** Évaluation de l'impact technico-économique d'une tolérance réglementaire temporaire permettant d'injecter une part minoritaire d'hydrogène gris à bas coût pour sécuriser l'approvisionnement des flottes en phase d'amorçage (*ramp-up*) lors des pannes ou opérations de maintenance des électrolyseurs.
- **Modélisation des échanges transfrontaliers :** Prise en compte des flux d'import/export d'hydrogène aux frontières régionales avec la Suisse et l'Italie.

Scénarios Horizon 2040 (Long Terme et Passage à l'Échelle)

Ce scénario projette la filière vers la maturité commerciale et l'intégration continentale :

- **Génération de séries temporelles industrielles :** Développement d'une méthodologie originale par typologie de procédés industriels pour reconstituer les profils de consommation d'énergie heure par heure site par site.
- **Infrastructures de transport par Pipeline (*Backbone*) :** Modélisation menée en partenariat scientifique avec le *Politecnico di Torino*. L'objectif est d'identifier les tronçons du réseau de transport de gaz naturel existant les plus pertinents économiquement à convertir à l'hydrogène (*repurposing*) par rapport à la construction de gazoducs neufs.
- **Planification multi-annuelle et multi-acteurs :** Modélisation des trajectoires d'investissement de 2030 à 2040 en intégrant la diversité des intérêts économiques individuels de chaque catégorie d'acteurs (producteurs, transporteurs, consommateurs).

Conclusion et messages-clés

1. L'Auvergne-Rhône-Alpes s'affirme comme un territoire de référence européen de l'hydrogène. La combinaison d'un écosystème dense (Tenerrdis, CEA, industriels, collectivités), de projets structurants (IMAGHyNE, ZEV, eM-Rhône, HYFEN, HYPSTER) et d'un plaidoyer européen assumé constitue un facteur clé de succès pour pérenniser ce leadership.

2. La décarbonation de l'industrie lourde impose de passer à l'échelle du captage du CO_2. Le retour d'expérience du Groupe Vicat le démontre : malgré l'efficacité énergétique, les combustibles de substitution et la réduction du ratio de clinker, des émissions de procédé intrinsèques subsistent. Le captage, le transport et la valorisation du CO_2 (projet VAIA, couplage avec l'hydrogène pour produire des e-fuels) sont indispensables pour atteindre la neutralité carbone.

3. Les ruptures technologiques sont déjà à l'œuvre. L'électrolyse à haute température SOEC portée par Genvia réduit la consommation électrique à environ 39 kWh/kg d'hydrogène (contre 50–55 kWh pour les technologies conventionnelles) en valorisant la chaleur fatale industrielle — un gain d'efficacité d'environ 30 %, sans métaux précieux ni PFAS.

4. Les infrastructures de transport et de stockage sont le chaînon manquant à sécuriser. La dorsale HYFEN (820 km, mise en service visée en 2032) et le stockage en cavités salines validé par le pilote HYPSTER (plus de 100 cycles d'injection/soutirage sans fuite) sont indispensables pour mutualiser les coûts : le couplage transport-stockage peut abaisser le coût de l'hydrogène d'environ 0,9 €/kg (–18 %).

5. Le succès des projets de mobilité repose sur une discipline d'ingénierie stricte. La méthodologie des « 4 piliers » d'Atawey — qualification fine de la demande engagée, logistique optimisée (trailers d'une tonne, production à moins de 300 km, taux de charge > 60 %), architecture technique maîtrisée et gouvernance claire des acteurs — conditionne la viabilité

économique des stations, comme l'illustre la station de Cournon-d'Auvergne (1,5 t/jour, plus de 50 tonnes distribuées).

6. Le verrou principal reste le problème de « l'œuf et de la poule » entre offre et demande. La consultation menée dans le cadre d'IMAGHyNE confirme que les porteurs d'infrastructures n'investissent pas sans engagements fermes de consommation, et réciproquement. Seule une coordination territoriale forte, adossée à des outils de planification comme la plateforme CAIRN Open (scénarios 2030/2040), permettra de débloquer les décisions d'investissement.

7. La compétitivité de la filière française se jouera aussi sur le terrain réglementaire. La reconnaissance de l'électricité bas-carbone d'origine nucléaire dans les critères RFNBO, la stabilité des financements européens (Clean Hydrogen Partnership, Fonds Innovation) et la préparation du prochain cadre financier 2028-2034 constituent des enjeux décisifs, portés activement par la Délégation régionale à Bruxelles.

En synthèse, cet événement a démontré que la filière hydrogène régionale est passée du stade expérimental à celui du déploiement industriel. La réussite de cette transition dépendra désormais de trois conditions : la sécurisation de la demande à long terme, l'achèvement des infrastructures mutualisées de transport et de stockage, et un cadre réglementaire européen favorable à l'hydrogène bas-carbone — domaines dans lesquels l'Auvergne-Rhône-Alpes dispose déjà d'une longueur d'avance à consolider.