

➤ The Exploration Company développe une navette spatiale européenne

La start-up franco-allemande développe et qualifie une navette cargo dans la perspective des stations spatiales post-ISS

The Exploration Company (TEC) est une société franco-allemande créée en juillet 2021 avec des sites à Munich (RFA) et Mérignac (France). Elle a été fondée par des anciens d'Airbus Space & Defense (issus des projets de module de service ATV et ESM/ORION) et de ARIANE GROUP et est dirigée par Hélène Huby. Elle comprend 110 personnes et continue à se développer en embauchant et en ouvrant des centres à Torino (Italie) et bientôt aux Etats-Unis. La société a démarré avec 5 millions d'euros de capitaux en novembre 2021 et a bouclé une deuxième levée de fonds de 40 millions d'euros en février 2023, ce qui en fait la plus grosse « série A » du secteur en Europe. Cette levée de fonds est destinée au développement du véhicule Nyx. Les fonds ayant souscrit sont nombreux, les leaders étant EQT Ventures et Red River West associés à des investisseurs comme Promus Ventures, Cherry Ventures, Vsquared, Omnes Capital, July Fund, Partech, Possible Ventures, Habert Dassault Finance, Schlumberger et Sista Fund. Ce financement ne sera pas suffisant pour couvrir tous les frais de développement nécessaires au programme envisagé, aussi il faudra prévoir un tour supplémentaire d'augmentation de capital.

En mai 2023, l'entreprise a bénéficié d'un contrat de l'Agence spatiale européenne (ESA) pour le développement de futurs véhicules spatiaux modulables en taille dont une version habitée. L'ESA a attribué 4 contrats sur ces thèmes à des sociétés européennes. La société Exploration Company a été distinguée pour le volet spatial du plan d'investissement d'avenir France 2030 pour son développement de moteur fonctionnant au méthane liquide et pour son projet DEMARIUS de logistique spatiale.

Au total, la société a reçu environ 15 M€ de contrats des agences spatiales. Enfin, elle a conclu un accord avec la société AXIOM SPACE aux Etats-Unis pour le ravitaillement en fret de sa plateforme. Ce contrat signé en septembre 2023 prévoit les étapes intermédiaires de validation du développement du véhicule spatial et son usage ultérieur, pour un montant supérieur à 150 M \$.

La capsule Nyx

Elle se compose d'un module de service et d'une capsule spatiale conique, qui est réutilisable et doit donc revenir sur Terre.

Le module de service n'est pas réutilisable et est capable de transporter 1400 kg de fret non pressurisé. La capsule peut transporter 2500 kg de fret pressurisé. Les missions envisagées peuvent durer jusqu'à 6 mois en orbite terrestre basse, pour ravitailler une station spatiale comme l'ISS.

D'autres missions envisagées sont le transport de fret en orbite lunaire (jusqu'à 5000 kg) et même livré au sol sur la Lune !

Après tous ces développements, les missions habitées pourront être envisagées avec la réalisation d'un module habitable. Ceci dessine une perspective de plusieurs versions de capsules NYX et de modules additionnels, une première version faisant la navette entre le sol et l'orbite basse LEO ; les autres, plus lourdes, seront aptes aux missions lunaires (donc avec un module d'alunissage) et aux missions habitées.

Parmi les innovations majeures de ces projets, on distingue :

- Le retour sur Terre de la capsule spatiale conique, avec le guidage, la rentrée dans l'atmosphère et l'atterrissage ;
- Le moteur lunaire permettant non pas de décoller depuis la surface de la Terre mais d'évoluer dans l'espace et de voyager jusqu'à la Lune et retour.
- Le développement du module habitable.

La capsule fait l'objet de trois démonstrateurs destinés à valider les technologies employées :

Le démonstrateur BIKINI lancé avec le premier tir d'ARIANE 6 en juillet 2024, est un mini-véhicule de 40 kg entièrement balistique (i.e. non guidé, non motorisé) et destiné à valider les matériaux résistants à l'échauffement provoqué par la rentrée dans l'atmosphère ainsi que l'aérodynamique, sa forme et sa stabilité. Malheureusement le dernier étage d'ARIANE6 chargé de l'éjection de cette charge spatiale n'a pas fonctionné et le BABY est resté attaché au véhicule principal en orbite. Cette qualification n'a donc pas été obtenue.

Le démonstrateur NYX/ADO est bien plus gros et motorisé par un moteur acheté - par exception - à Benchmark Space Systems de Burlington (Vermont – USA). Ce démonstrateur sera lancé en 2025 par le lanceur FALCON 9 de Space X. Il est destiné à valider le système de guidage et de rentrée dans l'atmosphère, ainsi que le système d'atterrissage (on prévoit d'utiliser un système de parachutes fournis par AIRBORNE SYSTEMS du New Jersey-USA). Les dimensions totales de la capsule sont de 2,5 m de diamètre et 1600 kg.

Le dernier démonstrateur a été baptisé **MISSION ODISSEY**. Son vol est prévu en 2026, ses dimensions sont celles de la cible, 4 m de diamètre pour un poids total de 8 t dont 4 t de charge utile.

Ce démonstrateur devrait conclure la phase de validation du transport de fret et permettre le démarrage de l'activité commerciale de logistique en orbite.

La logistique spatiale

C'est l'objet du premier contrat signé en Septembre 2023 par H. Huby, la CEO de TEC avec la société AXIOM SPACE SYSTEMS.

La NASA a décidé de se concentrer sur ses missions lunaires (et martiennes). Elle a abandonné l'activité spatiale en orbite basse à des sociétés issues de l'industrie privée pour les stations en orbite, les lanceurs et les navettes de transport entre le sol et l'orbite. Après SPACEX, qui a été très largement soutenue par la NASA, on voit apparaître des sociétés innovantes comme AXIOM SPACE qui va construire et exploiter une station en orbite et achète le service logistique en orbite à SPACE X et à The Exploration Company.

AXIOM SPACE est une start-up créée en 2016 par l'ancien patron du programme ISS Michael Suffradini. Elle développe sa station spatiale et a levé plus de 400 M \$ de fonds en 2016.

Le contrat passé entre AXIOM SPACE et TEC a une valeur de plus de 150 M \$, il prévoit la validation par les étapes des 3 démonstrateurs technologiques puis un service de logistique en orbite. Son but final est le développement d'un système concurrent à celui de la navette spatiale Space Dragon de Space X, qui est habitée et transporte les astronautes en orbite. Cette navette est aujourd'hui en situation de monopole.

Technologie

On peut noter une volonté de la part de TEC de maîtriser et développer en propre des technologies qui n'ont pas été jusqu'à présent utilisées en Europe, ceci parce que ni l'aventure ARIANE de lanceur de satellite, ni la coopération internationale autour de l'ISS n'ont confié à l'ESA et aux industries européennes des lots nécessitant leur usage.

Dans une perspective de maîtrise en propre, TEC prévoit de développer « in-house » les principales technologies nécessaires : la réemployabilité de la capsule (allers et retours multiples entre le sol et l'orbite basse), les motorisations en orbite et lunaire, le guidage de rentrée atmosphérique et l'atterrissage, le rendez-vous spatial et l'arrimage à la station orbitale.

Les moteurs MISTRAL, HURACAN et TYPHOON

TEC développe plusieurs versions de moteur spatial. Les choix essentiels visent à la facilité de fabrication (par impression 3D), à la réemployabilité. Les propulseurs baptisés MISTRAL et HURACAN font l'objet de démonstrateurs destinés à valider les technologies employées :

Les propulseurs MISTRAL liés à la capsule réutilisable NYX brûleront du carburant méthane en remplacement de l'hydrazine traditionnelle. On perdra un peu en poussée (3 à 5 %), mais on évitera le caractère dangereux et toxique de l'hydrazine, ce qui simplifiera beaucoup les manipulations de carburants sur le pas de tir. Les moteurs HURACAN destinés aux modules lunaires sont plus petits que des moteurs de décollage de lanceurs. Ils utilisent des ergols « verts » à base de méthane et

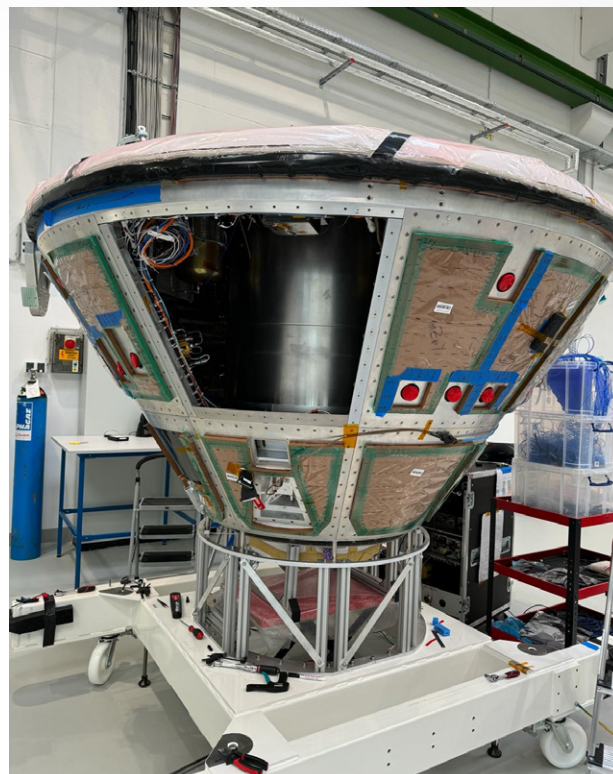


Figure 1 : Assemblage de la capsule NYX ADO baptisée Mission Possible. © TEC

de peroxyde et sont à cycle électrique. Les deux modèles de moteurs ont en commun d'être réutilisables, le module lunaire étant ravitaillable en orbite.

TEC développe en outre un moteur de forte poussée nommé TYPHOON.

Calendrier

Le premier rendez-vous était le vol du démonstrateur BIKINI avec le tir inaugural d'ARIANE 6 en juillet 2024. Ce vol devait qualifier l'aérodynamique et la résistance à l'échauffement de la plateforme, ce qui n'a pas été possible à cause de la défaillance du dernier étage d'ARIANE 6. Cette qualification sera obtenue par d'autres moyens.

Le deuxième rendez-vous est beaucoup plus important, prévu en 2025 avec la capsule NYX/ADO (figure 1), d'une dimension et d'un niveau d'innovation très importants. Ce vol est prévu avec une fusée FALCON 9 de Space X et qualifiera les procédures de guidage, de rentrée dans l'atmosphère et d'atterrissage.

Il rendra possible le vol de qualification final de NYX/MISSION ODISSEY qui démontrera en 2026 les procédures de rendez-vous en orbite et d'arrimage, ce qui ouvrira la porte à un service commercial de logistique fret en orbite basse. A cette époque le client AXIOM SPACE aura fait voler sa station spatiale (un des successeurs de la station internationale ISS) et en démarrera son exploitation commerciale pour les expériences physico-chimiques, des observations de la terre et des fabrications dans l'espace. ■ DM ●●●

► L'hydrogène « blanc » va-t-il révolutionner la production d'hydrogène décarboné ?

La découverte de gisements d'hydrogène naturel en divers points du territoire national laisse entrevoir la possibilité d'une filière bas coût pour la « production » d'hydrogène décarboné.

Le gaz dihydrogène H₂ est désigné désormais en lui accolant diverses couleurs selon son mode de production : gris ou noir lorsqu'il est fabriqué à partir de matières fossiles, rose à partir d'énergie nucléaire et vert pour l'hydrogène décarboné obtenu par électrolyse. Mais il peut également se trouver sous une forme naturelle et chimiquement pure dans certaines couches géologiques, notamment en France. On parle alors d'hydrogène blanc ou natif.

L'intérêt du développement d'une filière d'exploitation a priori moins coûteuse de sources d'hydrogène naturellement décarboné n'est plus à démontrer. Dans de très nombreux secteurs d'application (industrie, transports...) où l'énergie repose encore essentiellement sur les matières fossiles, on fonde beaucoup d'espoir sur l'hydrogène comme vecteur d'énergie décarbonée susceptible de souscrire aux objectifs de neutralité carbone à l'horizon 2050, avec l'espoir d'une baisse de 55 % des gaz à effet de serre d'ici 2030.

D'où provient l'hydrogène natif ?

L'Académie des technologies qui a consacré une note récente à ce sujet identifie 3 principales réactions permettant la production de dihydrogène dans le sous-sol :

- la décomposition (réduction) de l'eau en présence de roches riches en fer oxydé ;
- la radiolyse par la radioactivité naturelle des roches, qui casse la molécule d'eau ;
- la maturation tardive de la matière organique, en particulier des charbons, qui libère aussi, au-dessus de 200 °C, de l'hydrogène en profondeur, tout comme les processus industriels traditionnels de gazéification du charbon.

Ressources potentielles en hydrogène naturel sur le territoire

La possibilité d'exploiter à un coût réduit cette ressource en hydrogène n'est pas nouvelle puisque la Société canadienne Hydro-Québec extrait de l'hydrogène naturel dans des poches géologiques au Mali depuis plusieurs années. Le fait nouveau pour la France a été la découverte fortuite par des chercheurs lorrains du CNRS en 2023 de quantités importantes d'hydrogène natif présentes dans

les sous-sols du bassin minier entourant le puits de Folschviller en Moselle (figure 1a). Ce gisement constituerait même le plus important connu au monde à ce jour. Même si cette estimation doit être confirmée par des forages ultérieurs, on évalue en effet ce gisement lorrain à 46 millions de tonnes d'hydrogène à l'état primaire. A comparer aux 3 milliards de tonnes dont on estime que le pays aura besoin annuellement. D'autre part il semble que cette ressource se régénère en hydrogène naturel de façon continue.

Cette découverte a suscité un vif intérêt qui s'est traduit au plus haut sommet de l'Etat par une déclaration le 11 décembre 2023 annonçant des « *financements massifs pour explorer le potentiel d'hydrogène naturel dans le sous-sol français* ». Ce qui fut rapidement suivi de la délivrance par le gouvernement d'un permis exclusif portant sur « *les recherches de mines d'hydrogène natif, hélium et substances connexes* », accordé à l'entreprise TBH2 Aquitaine pour cinq ans. En l'occurrence la zone visée n'était plus l'Alsace mais un territoire de plus de 200 km² environ dans le Béarn.

Dans un premier temps, des travaux d'exploration ont pu ainsi démarrer avant que soient envisagés des premiers forages soumis à des autorisations ultérieures.

Côté lorrain, l'exploitant gazier Française de l'Énergie a également sollicité une autorisation sur un domaine couvrant une surface de 2 254 km² en Moselle et en Meurthe-et-Moselle dans le cadre du programme Regalar. D'autres dossiers sont en cours d'instruction au ministère de la transition énergétique, notamment de la part de Storengy associé à 45-8 Energy dans les Pyrénées-Atlantiques, ou Sudmine en Auvergne-Rhône-Alpes.

Une nouvelle filière française ?

Si la production d'hydrogène est très recherchée actuellement comme vecteur potentiel d'énergie dans le cadre de la transition énergétique, ses modes de production actuels sont loin d'être satisfaisants. A ce jour, 95 % de l'hydrogène produit est fabriqué par vaporeformage à partir d'hydrocarbures, via un processus fortement émetteur de CO₂, puissant gaz à effet de serre comme chacun sait. Pour décarboner l'hydrogène, on a donc recours à l'électrolyse de l'eau, un procédé très coûteux et au rendement faible (30 %), conduisant à un coût de 10 \$ par kilo d'hydrogène typiquement. Malgré cela, c'est une voie considérée jusqu'à présent comme un passage obligé qui a suscité de nouvelles initiatives industrielles (électrolyse haute température) auxquelles le gouvernement français a consacré une enveloppe de 9 milliards d'euros à l'horizon 2030.

Dans ce contexte, l'hydrogène blanc représente donc une réelle source d'espoir car il est naturellement exempt de CO₂. Comme il semble en outre qu'on ait affaire non pas à des réserves finies mais à la possibilité de produire un flux d'hydrogène en continu et étalé dans le temps, les avantages de cette solution, s'ils se confirment, sont indéniables. Le coût de l'hydrogène extrait serait également

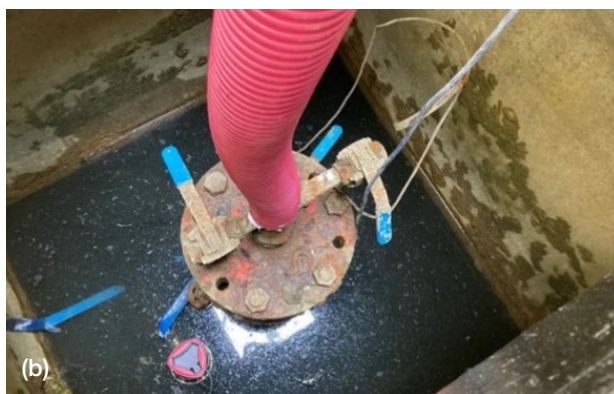
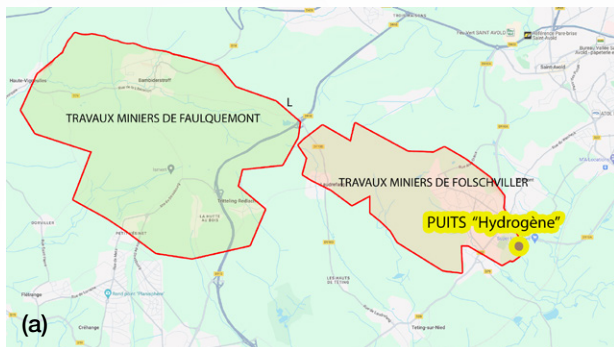


Figure 1 : (a) Localisation du gisement d'hydrogène natif de Folschviller (Moselle) ; (b) Mesure de l'hydrogène naturel dans le puits étudié par les chercheurs du CNRS © Eric Molodtsoff/ France3 Lorraine.

très compétitif. À titre d'exemple, la société canadienne Hydroma extrait au Mali un kilogramme d'hydrogène naturel pour moins d'un dollar, soit un gain d'un ordre de grandeur par rapport aux méthodes conventionnelles. A défaut de supplanter les modes de production actuels, l'hydrogène blanc pourrait donc se révéler un complément appréciable pour la production d'hydrogène décarboné.

Il faut toutefois modérer l'enthousiasme car on est face à un gisement un peu particulier où l'hydrogène est dissous dans l'eau. On ne peut donc préciser les processus à mettre en œuvre pour l'extraction avant d'avoir cerné précisément sa teneur en gaz hydrogène et l'extension du gisement concerné dans les 3 dimensions, notamment en profondeur¹.

Le contexte politique français incertain a malheureusement contribué à ralentir les prises de décision en 2024. Il faut souhaiter que le nouveau gouvernement se saisisse rapidement de ce dossier afin de continuer à soutenir cette filière naissante car la France possède des atouts qui lui permettraient de devenir bientôt leader en Europe dans la production d'hydrogène décarboné. ■ AB

¹ Grâce à une sonde conçue spécialement (figure 1b), les chercheurs lorrains ont mesuré un taux croissant d'hydrogène dissous en fonction de la profondeur pouvant atteindre 20 % à 1.250 mètres. Les modélisations laissent présager qu'à 3.000 mètres de profondeur, la teneur en hydrogène pourrait dépasser 90 %.

L'Office européen des brevets distingue des avancées notables en matière d'énergies renouvelables

Le 9 juillet 2024, l'Office européen des brevets (OEB en français ou EPO en anglais) a décerné ses récompenses annuelles pour le prix de l'inventeur européen². Ce prix se décline en plusieurs catégories avec dans chacune d'elles trois finalistes. La catégorie « petites et moyennes entreprises » a retenu notre attention. En effet, parmi les finalistes de cette catégorie figuraient Bruno Mottet, Lyderic Bocquet et plus globalement l'ensemble de l'équipe associée à la start-up Sweetch Energy. Nous avons déjà évoqué cette startup et l'énergie osmotique qu'elle entend domestiquer dans le numéro 2022-4, page 10.

Rappelons que l'énergie osmotique désigne l'énergie exploitable à partir de la différence de salinité entre l'eau de mer et l'eau douce, les deux natures d'eau étant séparées par une membrane échangeuse d'ions. Il s'agit ensuite de convertir les courants ioniques en courant électrique avec un système d'électrode. L'aventure a démarré grâce aux travaux théoriques de Lydéric Boquet spécialiste de nanofluidique. Des publications scientifiques au dépôt de brevet, le pas a été vite franchi. La technologie INOD (*Ionic Nano Osmotic Diffusion*) mise au point utilise une membrane spéciale constituée de nanotubes et fabriquée à partir d'un matériau biosourcé rentable. Lors des premiers dépôts de brevet, les matériaux envisagés étaient le nitrure de bore puis l'oxyde de titane, qui ont tous deux donné des résultats prometteurs. Cependant, ces matériaux présentaient l'inconvénient d'être coûteux. Mais la persévérance a été récompensée et les chercheurs français ont finalement trouvé un matériau biologique rentable pour la réalisation du dispositif. ●●●

² L'ensemble de la cérémonie peut être revue sur <https://www.youtube.com/watch?v=i7yloUvRvEQ&t=11s>



Figure 1 : Localisation du projet OsmoRhône1 à l'écluse de Barcarin (source : site internet de Sweetch Energy).

- Pour passer à la réalisation industrielle, la start-up Sweetch Energy, a été co-fondée par M. Mottet et M. Bocquet. Elle a collaboré avec la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) pour lancer le premier pilote d'usine osmotique de France, OsmoRhône1 (voir la figure 1 pour sa localisation géographique) qui devrait être opérationnelle avant la fin de 2024.

Dans la décade qui vient, une capacité osmotique de 500 MW pourrait être installée sur le Rhône et finalement réduire le coût de l'énergie osmotique, actuellement compris entre 150 et 180 € par MWh, à un montant de 50 à 80 euros à mesure que son utilisation augmentera. Selon Sweetch Energy, la production d'énergie osmotique pourrait permettre de porter la part mondiale de l'électricité renouvelable à 65 % en 2050, supérieure à la prévision actuelle de 50 %, contribuant de manière substantielle à la décarbonation du domaine de l'énergie. Et contrairement au solaire ou à l'éolien, l'énergie osmotique n'est pas une énergie intermittente.

Depuis 2023, Sweetch Energy a confié au cabinet d'architecture Chaix&Morel le soin d'imaginer différents types de structures pour accueillir les modules : surélevée au bord de l'eau, sur péniche, sur flotteurs d'air, en îlot artificiel flottant... A chaque fois, cela permet d'impacter le moins possible le sol, de proposer de nouveaux espaces publics voire même d'accueillir la biodiversité marine pour la version immergée.

Toutefois et le lecteur l'aura deviné, le duo français n'a pas été récompensé par le titre d'inventeur européen de l'année dans la catégorie « petites et moyennes entreprises ». La lauréate est la polonaise Olga Malinkiewicz (et son équipe) pour ses travaux sur des cellules photovoltaïques à pérovskite imprimables et flexibles.

La pérovskite, découverte et analysée dès les années 1830, désigne à l'origine un minéral du titanate de calcium, mais on appelle désormais pérovskites différents minéraux de même structure cristalline. Dans les années 2000, leur intérêt pour la réalisation de cellules photovoltaïques est mis en évidence. Le rendement ces cellules photovoltaïques utilisant ces matériaux est en constante augmentation depuis cette époque. Il est passé de 3,8 % en 2009 à 25,2 % en 2019, et 29,1 % pour le tandem de pérovskite et de silicium, soit une efficacité supérieure aux cellules



Figure 2 : Exemple de structure imaginée pour être une centrale électrique basée sur l'utilisation de l'énergie osmotique (source : site internet de Sweetch Energy).

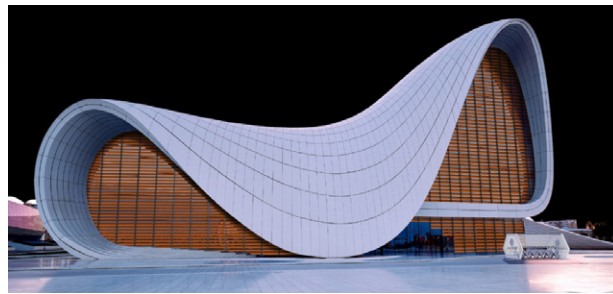


Figure 3 : Exemple de bâtiment recouvert de cellules photovoltaïques à pérovskites (source : site internet de Saule Technologies).

photovoltaïques à jonction p-n au silicium³. Ces performances s'expliquent notamment par le fait que les pérovskites permettent d'absorber un spectre de longueurs d'onde plus large. En 2013, Olga Malinkiewicz, alors doctorante à l'Université de Valence en Espagne, crée une cellule photovoltaïque en posant une couche de pérovskites par évaporation, et finalement par simple impression à jet d'encre. Par rapport à la technologie à haute température utilisée jusqu'alors, cette découverte permet de mettre en place la production à l'échelle industrielle de cellules solaires à pérovskites. A cet effet, dès 2014 Olga Malinkiewicz contribue à la création de Saule Technologies, entreprise qui compte désormais plus de 60 scientifiques et ingénieurs.

Le modèle de cellules développé par Saule Technologies est inspiré d'un dispositif électroluminescent organique (OLED), qui comprend de fines couches de film organique placées entre deux fines couches d'électrodes conductrices. La production de ces cellules est rentable, car la pérovskite est dissoute dans un solvant et légèrement appliquée sur le film à l'aide d'une imprimante à jet d'encre. Le polymère flexible et léger enduit de pérovskite exerce moins de pression structurelle sur les bâtiments par rapport aux panneaux solaires ; un mètre carré de cellules photovoltaïques à pérovskite peut être manipulé sans efforts, tandis que des panneaux de silicium de taille similaire pèsent entre 20 et 30 kilogrammes. Au fur et à mesure que la société se développe, Olga Malinkiewicz utilise plusieurs formes de protection pour sa propriété intellectuelle, allant des brevets aux secrets commerciaux pour la formule de son encre.

Les applications de ces cellules souples et légères à haut rendement concernent tout à la fois l'internet des objets, le bâtiment et les possibilités d'adaptation à des structures existantes (voir figure 3) et l'électromobilité : stations modulables de recharge des véhicules, cellules imprimées sur le toit des véhicules.

Gageons que ces innovations mises à l'honneur par l'office européen des brevets représenteront des technologies de rupture dans la course mondiale à la décarbonation et à la transition énergétique et que nous en verrons bientôt les fruits dans nos vies quotidiennes. ■ JC

³ Les chiffres donnés ici sont issus d'un article de Wikipedia bien documenté.

➤ Une stratégie ambitieuse pour la captation et le stockage du carbone en France

En juillet 2024, le Ministère de l'Economie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique a publié un état des lieux et perspectives du déploiement du CCUS¹ en France. Ce document fixe la stratégie et les ambitions françaises en la matière.

Le CCUS doit être utilisé en renfort des autres actions mises en œuvre (efficacité énergétique, évolution des process, électrification), afin de capter les émissions résiduelles incompressibles, assurer la transition en attendant la mise en œuvre de solutions plus pérennes ou combler l'absence de solution de décarbonation.

La stratégie CCUS française repose sur trois phases de déploiement distinctes (figure 1) :

- 2025-2030 : premiers déploiements amenant le développement de deux à quatre hubs CCUS (captant chacun de 1,5 à 4 Mt de CO₂/an) dans les zones industrielles de Dunkerque, de Fos-sur-Mer, du Havre, de Saint-Nazaire ou de l'axe rhodanien

> **cible : 4 à 8 Mt de CO₂ captés par an**

- 2030-2040 : développement de stockages souterrains et de réseaux CCUS, permettant l'extension du captage à d'autres zones géographiques (Bassin parisien, Méditerranée ou Piémont pyrénéen) et à d'autres secteurs d'activités (incinération des déchets par exemple)

> **cible : 12 à 20 Mt de CO₂ captés par an**

- 2040-2050 : développement d'un réseau d'infrastructures CO₂ à l'échelle nationale et européenne permettant de capter l'intégralité des émissions résiduelles des sites industriels les plus émetteurs pour atteindre la neutralité carbone en fin de période

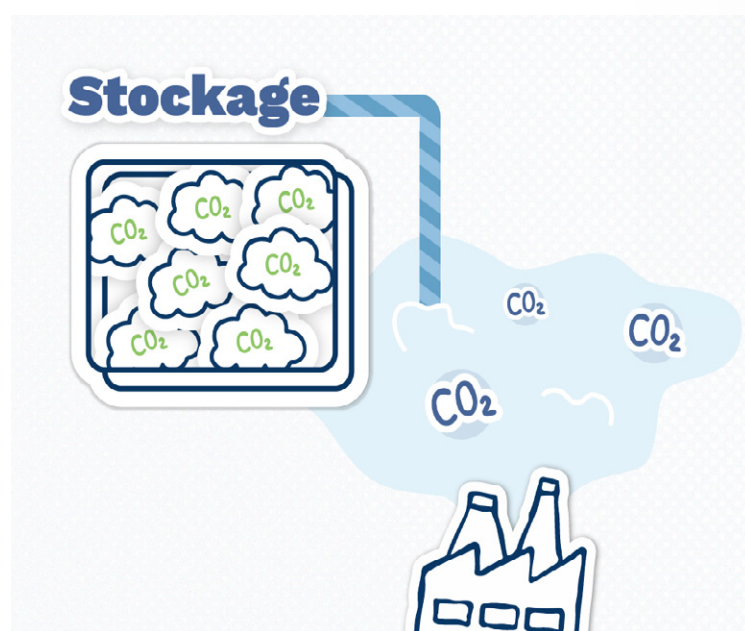
> **cible : 30 à 50 Mt de CO₂ captés par an**

Au niveau européen, le règlement Net-Zero Industry Act (NZIA) prévoit le développement de 50 millions de tonnes de capacité annuelle de stockage géologique de CO₂ au sein de l'Union européenne d'ici 2030 et des obligations pour les producteurs d'hydrocarbures de contribuer à l'atteinte de ces objectifs.

¹ Le terme CCUS renvoie à l'acronyme anglais « Carbon Capture, Utilisation and Storage ».

Le CCUS implique une série de solutions technologiques pour :

- capter le CO₂, principalement en provenance de sites industriels émetteurs, de le concentrer ;
- le transporter et le stocker par exemple dans des gisements de combustibles fossiles dont l'exploration-production est achevée ;
- le valoriser en l'utilisant comme intrant, pour fabriquer des produits (e-carburants produits à partir d'hydrogène et de CO₂, production de plastiques, de béton, etc.).



Le CCUS n'est pas une technologie nouvelle mais les objectifs de réduction des gaz à effet de serre nécessitent la mise en place d'une véritable industrie dédiée au CCUS, ce qui se traduit par des installations de captage de très grande taille, un développement massif des réseaux de transport, des infrastructures pour le stockage très étendues et enfin une filière industrielle considérable pour valoriser le CO₂ en carburants de synthèse et autres produits à haute valeur ajoutée.

Ce déploiement à grande échelle suppose donc que soient levés de nombreux défis parmi lesquels :

- la réduction des coûts du captage, l'étape la plus coûteuse de la filière CCUS ;
- la démonstration des capacités de stockage massif de CO₂ dans les aquifères salins profonds, et la maîtrise du confinement du CO₂ et de la fiabilité du stockage sur de longues périodes (plusieurs centaines d'années) dans des structures géologiques de stockage.

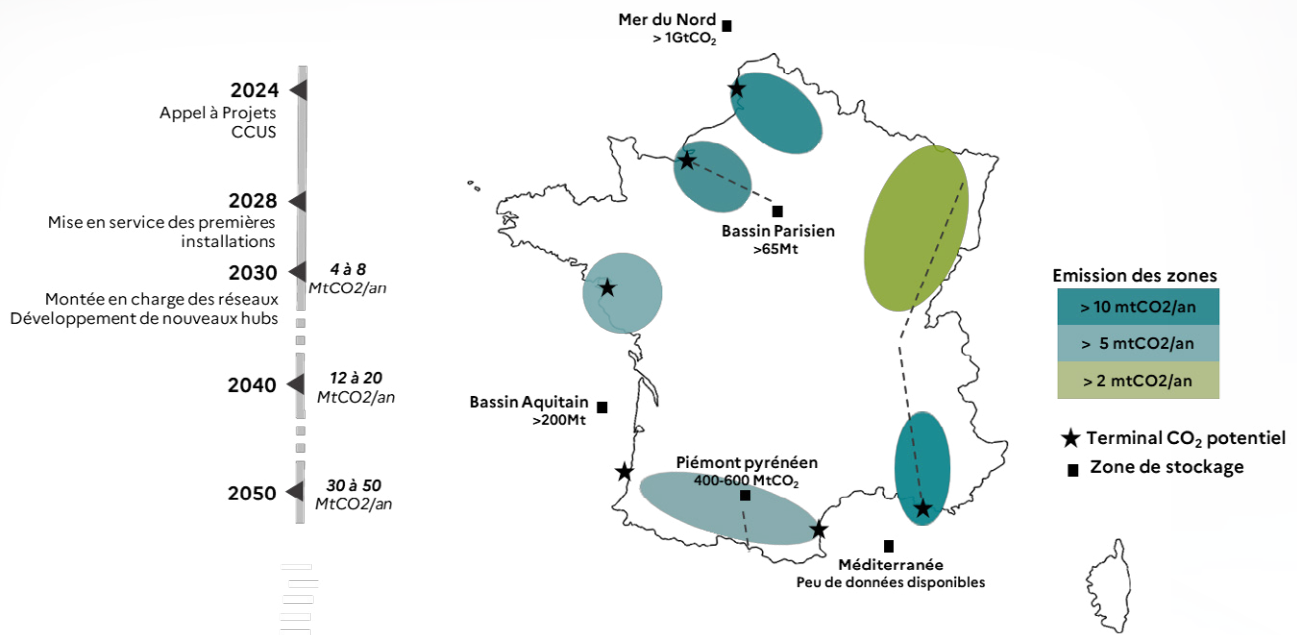


Figure 1 : Trajectoire CCUS en France.

- la démonstration des procédés de valorisation de quantités importantes de CO₂ à un coût raisonnable.

Une coopération est progressivement en train de se mettre en place en Europe pour faciliter cette technologie soutenue notamment par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) et l'Agence internationale de l'énergie (AIE) :

- En Europe du Nord, la Norvège, la Suède, le Danemark, et les Pays-Bas ont conclu, en 2024, des protocoles pour le transport transfrontalier du CO₂ avec la Norvège, considérée comme potentiel cimetière de carbone grâce à ses anciens gisements d'hydrocarbures en mer.
- En Norvège, le projet Northern lights porté par les géants pétroliers Equinor, Shell et TotalEnergies, devrait réceptionner à compter de 2025 du CO₂ en provenance d'installations industrielles ou énergétiques pour le stocker indéfiniment sous les fonds de la mer du Nord.
- La Suède a notifié à la Commission son intention d'adopter un régime d'aides d'un montant de 3 milliards d'euros pour soutenir des projets visant à éliminer les émissions de CO₂ d'origine biologique grâce au captage et au stockage permanent.

D'après le rapport spécial sur le captage, l'utilisation et le stockage du CO₂ publié par l'AIE en 2020, la capacité mondiale de stockage de CO₂ serait comprise entre 8 000 et 55 000 gigatonnes, mais le coût de mise en place du CCUS reste encore dissuasif par rapport à l'achat de CO₂.

Fin 2023, 40 entreprises commerciales dans le monde captaient un total de 45 millions de tonnes (Mt) de CO₂, selon l'AIE. Soit environ 0,1 % des émissions annuelles mondiales. Il faudra en capter 30 fois plus pour atteindre l'objectif de zéro émission nette d'ici 2050. ■ SD

Le métro parisien modernise et étend certaines de ses lignes

La RATP a franchi une phase importante dans le programme pluriannuel de rénovation et modernisation de ses lignes en réceptionnant le nouveau système d'automatismes destiné aux lignes 14, 4 et 1. Siemens Mobility qui a assumé une part importante de cette modernisation livre ici quelques précisions techniques sur les améliorations apportées.

Cette année, Siemens Mobility a livré à la RATP, pour le compte d'Ile-de-France Mobilités, l'automatisation des lignes 4, 11 et 14, dans des conditions très contraintes et dans les délais voulus pour les Jeux Olympiques et Paralympiques de Paris 2024. Retour sur ces succès ferroviaires.

Ligne 14

C'est en 2018 que la RATP confie à Siemens Mobility le projet de modernisation et de prolongement de l'automatisme.

tisation de la ligne 14, avec pour objectif de remplacer le système d'automatismes existant – appelé Meteor – par un nouveau système d'automatismes de dernière génération, le Trainguard MT CBTC, capable de gérer le prolongement de la ligne au nord et au sud sur 14 km.

En 2024, l'entreprise réalise une première mondiale avec la migration d'une ligne de métro déjà automatisée sans conducteur (GoA4) vers un CBTC GoA4. Ce système améliore encore les performances, la sécurité et la disponibilité de la ligne, déjà à un niveau très élevé. Pour cela, Siemens Mobility a déployé les équipements du nouvel automatisme sur la voie et à bord des 72 nouveaux trains MP14 prévus au projet.

D'ici 2025, les trains circuleront à 85 secondes d'intervalle, transportant 40 000 voyageurs par heure et par direction et jusqu'à un million d'utilisateurs par jour. La ligne, désormais longue de 28 km, relie l'aéroport d'Orly au centre de Paris en 20 minutes. Elle constitue l'épine dorsale du système de transport public parisien, reliant les futures lignes 15, 16, 17 et 18 du réseau du Grand Paris Express.

Ligne 4

En 2024, Siemens Mobility a également finalisé l'automatisation intégrale de la ligne 4 et de son prolongement au sud jusqu'à Bagneux-Lucie Aubrac, sans interruption majeure du service aux voyageurs. Après une période mixte, durant laquelle des métros avec conducteur ont circulé conjointement avec des navettes automatiques, le service commercial de la ligne est à présent entièrement assuré par des navettes automatiques sans conducteur.

Siemens Mobility a été choisi fin 2015 par la RATP pour automatiser cette ligne, équipant ainsi de ses automatismes Trainguard MT CBTC et de sa radio les voies, les locaux techniques, et les navettes automatiques qui circulent sur la ligne 4.

Le nouveau système CBTC GoA4 permet de réduire considérablement l'intervalle entre les trains de 105 à 85 secondes et de diminuer la consommation d'énergie de 17 %. La ligne 4, avec 700.000 voyageurs par jour, est la deuxième plus fréquentée de Paris. La réalisation du système d'automatismes inclut celle du Poste de Commande Centralisé (PCC) qui gère les contrôles / commandes du système de signalisation et du système de gestion de l'alimentation électrique de traction, et s'interface avec les automatismes et la radio (à bord et au sol).

Ligne 11

Enfin, Siemens Mobility a livré les automatismes sol du nouveau système de commande contrôle des trains de la ligne 11, prolongée à l'est jusqu'à Rosny Bois-Perrier.

En 2017, le groupe a remporté l'appel d'offre pour fournir les automatismes sol du système d'assistance à la conduite de type CBTC GoA2 sur la ligne 11 existante et sur son futur prolongement.

Les automatismes de Siemens Mobility assurent une fréquence de 105 secondes entre les rames, renforcent la sécurité de la ligne et permettent de diminuer la consommation d'énergie. Avec six stations supplémentaires, la ligne 11 est désormais deux fois plus longue et dessert une zone très dense de la Seine-Saint-Denis. Cinq villes du département et plus de 80 000 personnes bénéficient du nouveau tracé. ■ **FG et Siemens Mobility**



Figure 1 : L'équipe qui a travaillé sur le PCC de la ligne 4. (Source Siemens Mobility).