

Lumière sur la transition énergétique

Qui dit transition du secteur énergétique dit décarbonation donc électrification des usages. Remise en perspective de certains concepts clefs dans un contexte économique et géopolitique chaque fois plus complexe, au sortir d'une crise sanitaire et de la COP26.

Texte : Rémy Genet

**POURQUOI IL EST
FONDAMENTAL DE
CONSIDÉRER LE SUJET DU
CLIMAT LORSQU'ON ABORDE
CELUI DE L'ÉNERGIE**

Deux attitudes opposées envisagent le changement climatique : on peut croire que l'humain n'y est pour rien ou si peu, que l'état des connaissances scientifiques est insuffisant dans la compréhension de la paléoclimatologie (étude des variations du climat) de la Terre et que bon an mal an, l'avenir est incertain par nature alors, à quoi bon s'y projeter et surtout, pourquoi s'attribuer d'emblée une responsabilité ? On peut au contraire croire les conclusions du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), dont le dernier rapport, qui date du mois d'août 2021, renforce ce constat : « l'influence humaine a réchauffé l'atmosphère, l'océan et la terre. Des changements généralisés et rapides dans l'atmosphère, l'océan, la cryosphère et la biosphère se sont produits [...] Les augmentations observées des concentrations de gaz à effet de serre (GES) depuis environ 1750 sont sans équivoque causées par les activités humaines ».

Croire à l'humilité de ce rapport et aux éléments de langage bien calibrés qu'il comporte (les scénarios plus ou moins alarmants sont exposés selon leur probabilité : très probable, probable... etc.), faire confiance à ce vivier de connaissances évolutif, chaque fois plus précis que des milliers de scientifiques s'accordent à vulgariser, bien souvent de manière benévole, c'est immédiatement comprendre les enjeux d'une réduction des émissions de GES dans l'atmosphère, CO₂ en tête, afin d'atteindre la neutralité carbone vers la moitié du siècle — c'est-à-dire un équilibre entre les émissions de carbone dans l'atmosphère et leur absorption par les puits de carbone (sols, océans, forêts). Atteindre cette neutralité permettrait de limiter le réchauffement climatique à 1,5-2 °C.

Il convient alors de rappeler que presque 80 % des émissions de GES issues des activités humaines proviennent de la production et la consommation d'énergie. De là l'indissociabilité du changement climatique et de la volonté de transition énergétique. Il faut en effet décarboner massivement le monde de l'énergie si l'on souhaite freiner et stabiliser (au XXI^e siècle) la tendance climatique actuelle pour s'offrir un futur décent et en assurer la pérennité pour les générations à venir. Qui dit décarbonation dit remplacement des énergies fossiles sur lesquelles repose l'économie tout entière.

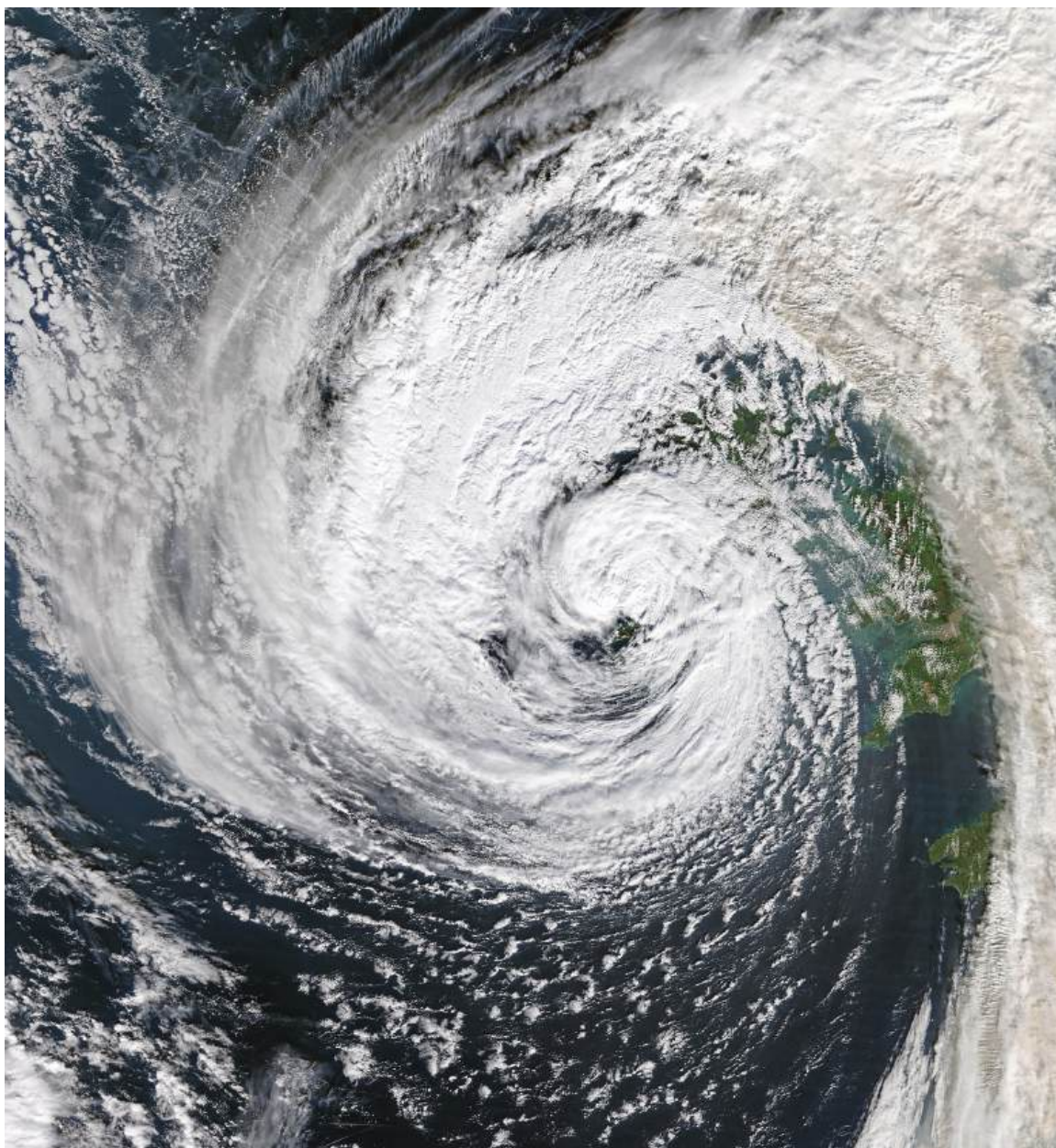


Théo Imbert 

Ingénieur travaillant à l'installation de batteries au lithium sur les réseaux électriques, en Angleterre notamment, pour pallier à l'intermittence des énergies renouvelables.

Son avis sur la transition énergétique : « Je suis profondément convaincu que décarboner le secteur énergétique et la mobilité tout en assurant la justice sociale est l'un des enjeux majeurs du XXI^e siècle. Je souhaite apporter ma pierre à l'édifice des solutions de demain ».

Son anecdote de la transition énergétique : « Je tiens mon bilan carbone à jour. Je ne prends plus l'avion pour aller à l'anniversaire d'un ami à Biarritz, conscient que ma



Ouragan Ophelia, Irlande ©NASA Images

consommation annuelle de CO₂ exploserait. Aujourd'hui les Français consomment en moyenne 11T de CO₂ par an par personne. Si l'on veut à terme respecter les objectifs fixés par l'Accord de Paris, il faudrait tomber à 2 T. C'est très compliqué, d'autant plus que certains usages sont contre-intuitifs. Je me suis donc fixé une limite de 6T et je crois qu'en 2020 je m'y suis tenu, en partie grâce ou à cause de la crise sanitaire».

Ce qui lui donne foi en l'avenir : « Les gens de mon âge (ndlr : Théo a 25 ans), qui sortent des grandes écoles d'ingénieurs françaises, sont largement sensibilisés à la cause du réchauffement climatique. On veut réduire notre empreinte environnementale et traduire notre engagement dans nos métiers, ce qui passe aussi par l'analyse critique des pratiques de nos employeurs. On parle ici d'une niche mais j'ai bon espoir que le phénomène s'étende ».



Manuel Maiguashca

Ancien vice-ministre des Mines et de l'Énergie de Colombie, conseille aujourd'hui des entreprises et des investisseurs privés du secteur énergétique.

Son avis sur la transition énergétique : «La transition doit s'opérer pour des raisons économiques et non pas pour des raisons anthropologiques ou d'agenda politique, notamment dans les pays en voie de développement»

Son anecdote de la transition énergétique : «La matrice électrique de Colombie repose à 60 % sur l'hydroélectricité provenant des grands fleuves du pays mais elle n'est plus considérée « verte » et on favorise donc le développement du solaire et de l'éolien à son détriment. C'est tout à fait incohérent et ce n'est pas viable économiquement». Ndlr : en prévention des risques d'inondation dus à une faille dans l'un des tunnels de conduite du barrage d'Ituango, le plus grand du pays, quelques milliers de personnes dans le voisinage immédiat du barrage avaient été évacués en 2018.

Ce qui lui donne foi en l'avenir : «La fusion nucléaire est la seule vraie solution à terme. Inépuisable, propre et plus dense que tout ce que l'humanité a connu jusqu'à maintenant». Ndlr : un kilogramme de combustible de fusion pourrait fournir la même quantité d'énergie que 10 millions de kilogrammes de combustible fossile.

ÉLECTRICITÉ : LA PARTIE ÉMERGÉE DE L'ICEBERG

Il faut parler de mix énergétique et non pas de mix électrique pour comprendre l'étendue des enjeux. Sans énergie, pas d'électricité ; sans électricité, pas d'économie. Il faut aussi considérer que le mix énergétique d'un pays concerne sa consommation et non pas sa production ni son exportation. Ainsi la Colombie a un mix électrique exemplaire, reposant presque exclusivement sur l'hydroélectricité tandis que son mix énergétique repose largement sur les hydrocarbures. A priori admirables, les quelque 20 millions de tonnes d'équivalent pétrole (Mtoe) consommés par la Norvège par an le sont majoritairement sous forme d'électricité, laquelle est produite par des barrages. Mix par-faits, tant énergétique qu'électrique? Oui, si l'on oublie de considérer que la Norvège produit et exporte près de 180 Mtoe de pétrole et de gaz par an...

Dans ses diagrammes de Sankey actualisés en 2019, l'Agence internationale de l'énergie (IAE) reportait une production (importation incluse) annuelle mondiale totale d'énergie proche de 860000 pétajoules, c'est-à-dire plus de 20527 Mtoe. La consommation correspondante, tous secteurs d'activités confondus, s'élevait à 9985 Mtoe, la différence entre production et consommation s'expliquant principalement par l'export et les pertes, dans cet ordre. Lorsque l'on oppose dans les débats publics les différentes sources d'énergies dites renouvelables entre elles ou au charbon et au nucléaire par exemple, dans la production d'électricité, on aborde moins de 25 % des usages (c'est-à-dire la consommation) de l'énergie dans le monde. En effet, la majeure partie de ces quelque 10000 Mtoe consommés l'est sous forme d'énergies fossiles, notamment dans les industries lourdes et les transports. Aux États-Unis, deuxième plus gros émetteur actuel de CO₂, seulement 20 % de l'énergie est consommée sous forme d'électricité.

On peut ainsi débattre tant qu'on veut du bien-fondé d'un parc éolien ici ou de panneaux solaires là pour alimenter la centrale qui fournira à son tour à nos machines l'électricité dont elles ont besoin pour fonctionner mais, même si ces sources renouvelables avaient les attributs du pétrole (densité et permanence en particulier), on oublierait néanmoins de se poser la question de leur production, de leur transport ainsi que celui de tous leurs composants. En d'autres termes, l'enjeu de notre époque est systémique : il s'agit d'électrifier les usages tout autant que de coupler à la production de l'électricité des sources renouvelables d'énergie.

Qui dit électrification des usages dit augmentation, additionnelle, de la demande en énergie – puisqu'il faut bien construire les infrastructures dédiées, faire évoluer celles



À l'intérieur d'une centrale hydroélectrique, un générateur à turbine convertit l'énergie de l'eau en force mécanique puis en électricité © Roman Zaiets

existantes ou les remplacer en fin de vie. Additionnelle car aujourd'hui près d'un milliard de personnes n'ont toujours pas accès à une source fiable d'électricité dans le monde et qu'à mesure que tous les pays s'industrialisent et que de plus en plus de personnes se connectent donc au réseau électrique local, cette demande à elle seule devrait augmenter

de près de 80 % d'ici 2050. Si l'on ajoute les besoins de conversion du système énergétique actuel afin que demain près de 70 % de notre consommation soit satisfaite par des énergies renouvelables comme le suggère l'IAE, cette même demande en électricité devrait en réalité tripler d'ici à 2050. ►



LES ÉNERGIES FOSSILES NOUS RENDENT UN GRAND SERVICE

En 2021, au sortir de la crise sanitaire, la demande en énergie renouvelable est plus forte que l'offre. Naturellement, États et secteur privé sollicitent alors les infrastructures existantes, principalement alimentées en hydrocarbures (et nucléaire dans une moindre mesure) et capables de répondre à cette demande en énergie. Entre 2000 et 2019, l'augmentation de la production de charbon a été sept fois plus importante que celle de l'énergie solaire et quatre fois plus importante que celle de l'éolien. Au sortir de la COP26 le mois dernier, sous impulsion de l'Inde clamant son droit légitime au développement, les pays signataires se sont engagés à réduire leur utilisation dudit charbon et non pas à en finir avec lui. Bref, on ne remplace pas les hydrocarbures en un claquement de doigts.

Les énergies fossiles sont incroyables! Ce n'est pas pour rien que la révolution industrielle s'en est alimenté et qu'elles représentent aujourd'hui plus de 70 % de notre

consommation énergétique mondiale. Tout ce qui constitue le confort moderne est composé d'hydrocarbures ou y a recours en phase de production ou d'acheminement. Le foyer type des familles des pays développés est truffé d'équipements résultant de la pétrochimie : les structures en ciment, les appareils électroniques et électroménagers (leur acier, aluminium, plastique), les meubles, sols et plafonds (leur revêtement), les tissus (leur nylon, polyester, etc.), les produits d'entretien, les médicaments et leurs emballages (leur plastique, détergent, adhésif).

La densité énergétique des hydrocarbures est excellente et nombre d'entre eux se transforment à l'état liquide ou gazeux à température ambiante. « Seuls » inconvénients, par ordre d'importance et d'urgence : leur combustion génère des GES et leurs réserves ne sont pas éternelles. À ce titre et à l'exception d'une mince poignée d'États (du Golfe), il semble que le pic de production de pétrole brut de tous les principaux fournisseurs dans le monde ait d'ores et déjà été atteint sans possibilité de l'égaliser dans le futur, induisant aussi et nécessairement le besoin d'une transition énergétique. Même si l'on ne croit pas au réchauffement climatique, les sources de brut ne sont pas éternelles. C'est à l'inverse bien le principe des énergies renouvelables : pourvu



Raffinerie de pétrole © Oaklizm

qu'on sache les transformer en électricité ou en chaleur, elles seront toujours là pour subvenir à nos besoins.

La chaîne TED-Ed des conférences TED a publié en début d'année une vidéo permettant de se donner une idée du potentiel des principales sources d'énergie connues en comparant l'espace total requis par l'une ou l'autre pour que la consommation électrique mondiale actuelle soit satisfaite. Ainsi, considérant toute la chaîne de valeur (extraction et transformation lorsque nécessaire, production, acheminement et stockage), on apprend que 1200 km² de terre seraient nécessaires pour contenir toutes les installations relatives à la production d'électricité sur la base d'énergies fossiles, quatre fois plus dans le cas du nucléaire, 80 fois plus dans le cas du solaire (superficie équivalente à celle de la Corée du Sud), 1700 fois plus dans le cas de l'éolien (superficie du Mexique). Il s'agit d'un prisme d'interprétation incomplet qui ne rend pas compte des disparités financières, opérationnelles et environnementales inhérentes à chaque solution mais qui permet cependant de se faire une idée de l'efficacité des énergies fossiles en 2021. Mieux vaut deux fois qu'une : on ne les remplace pas facilement. ►


Rafael Kawecki 

Responsable stratégie chez Siemens Energy.

Son avis sur la transition énergétique :

« L'électricité produite aujourd'hui provient majoritairement des combustibles fossiles, nous avons besoin d'une solution intermédiaire tandis que nous augmentons le recours aux sources renouvelables. Une étape très importante consiste donc à améliorer l'efficacité des installations existantes afin de limiter leur impact environnemental, des composants simples comme les pompes à eau ou les filtres permettant de capturer les émissions de GES, aux plus complexes comme les turbines d'une centrale électrique. Nous devons le faire graduellement, de la même façon que le monde est un jour passé de l'éclairage classique à la technologie LED en l'espace de quelques années ».

Son anecdote de la transition énergétique :

« Notre usine de démonstration Haru Oni est notre projet phare sur la voie de la décarbonation du secteur des transports. Siemens Energy et Porsche se sont associés à un certain nombre de sociétés internationales pour construire une usine industrielle de production de carburant pratiquement neutre en CO₂ (eFuel) à Punta Arenas, au Chili. L'usine pilote devrait produire environ 130 000 litres d'eFuels en 2022. La capacité augmentera ensuite à 55 millions de litres d'ici 2024 puis 550 millions de litres d'ici 2026. C'est assez de carburant pour que plus d'un million de personnes conduisent leurs voitures neutres en carbone pendant près d'un an ».

Ce qui lui donne foi en l'avenir : « Le simple fait que nous puissions discuter de transition énergétique est en soi une avancée de ces dix dernières années. Nous nous demandons systématiquement si ce que nous entreprenons est en faveur ou en défaveur de l'environnement ».

Du potentiel photovoltaïque de l'Espagne

Texte : Alba García Montagud

Avec Hugo Lucas, responsable de la communication et des relations institutionnelles de l'Institut pour la diversification et les économies d'énergie (IDAE), du ministère de la Transition écologique d'Espagne, et Carlos López Torrego, directeur technique de Cyrolovita XXI, une entreprise qui développe des projets photovoltaïques sur le territoire national.



Hugo Lucas

Qu'entend-on par « potentiel solaire » espagnol ?

Il est d'abord physique : l'Espagne est le pays le plus ensoleillé dans l'Union européenne. L'Andalousie est la région bénie du soleil entre toutes tandis qu'à Murcie, la brise marine bénéficie aux installations en refroidissant les panneaux photovoltaïques exposés au soleil, ces mêmes panneaux qui, dans une autre région aux conditions d'exposition comparables, produiraient moins d'énergie car la température de leurs cellules serait plus élevée. L'infrastructure électrique en Espagne est un goulot d'étranglement mais tout est question de planning et je suis convaincu que le plan quinquennal en préparation saura équiper le pays en vue d'un mix électrique composé à 74% d'énergies renouvelables d'ici 2030, dans lequel les installations photovoltaïques joueront un rôle primordial.

Quels obstacles identifiez-vous pour le développement de l'énergie solaire en Espagne ?

Le déploiement à grande échelle des infrastructures solaires en Espagne, à l'instar des autres sources renouvelables, est aujourd'hui confronté au défi de l'acceptation sociale et de la compatibilité d'usage des territoires. C'est une préoccupation tout à fait légitime. Et il y a déjà des réponses qui sont promues dans tous les programmes et activités d'aide du gouvernement et de cet institut. Minimiser les impacts liés à l'utilisation des terres et maximiser l'impact socio-économique, tel est l'objectif. Tous ces projets sont développés sur des terres anthropisées, c'est-à-dire déjà transformées et exploitées par l'homme. Concrètement, on place des panneaux solaires sur le toit de bâtiments existants ou des terres anciennement cultivées.

Pourquoi cet engouement des Espagnols pour l'énergie solaire ?

L'électricité produite à partir d'énergie solaire est la moins chère du pays. Nous produisons nos panneaux nous-mêmes et les installons. Particuliers et entreprises ont compris qu'ils réduisaient le montant de leurs factures grâce au solaire. Nous communiquons sur les « 4D » ou le « système décarboné, décentralisé, numérisé (digitalisé) et démocratisé ». Dans le cadre de l'autoconsommation tout du moins, je pense que l'Espagne est très bien engagée sur le chemin d'une transition énergétique durable.

Carlos López Torrego



Quels obstacles identifiez-vous pour le développement de l'énergie solaire en Espagne ?

Ils sont sociaux et environnementaux et s'appliquent aux énergies renouvelables en général je dirais. Elles vont changer notre paysage. Une centrale nucléaire de 1GW de puissance requiert environ 7ha de terrain. Il en faut 2500 pour une ferme photovoltaïque de 1GW d'une puissance comparable. L'Espagne est engagée sur la voie des renouvelables, très bien, mais il va falloir que les gens comprennent que la réaction

« nimby » (*not in my backyard*) a ses limites. Nous allons tous voir pousser des parcs photovoltaïques au-dessus du dos des moutons qui paissent dans le pré d'en face. Attention cependant, je crois que nombre de préoccupations font sens : je me souviens, l'année dernière, qu'un concessionnaire d'autoroute nous avait demandé de confirmer que nos panneaux, à certaines heures de la journée, n'allaient pas éblouir les conducteurs et provoquer des accidents. Eh bien oui... il vaut mieux orienter les panneaux de façon à ce qu'ils soient les mieux exposés possible sans perturber le trafic sur la portion de route en question.

Les environnementalistes que nous envoie le gouvernement lorsque nous faisons une étude de terrain nous demandent des rapports d'impact. Le problème est qu'il n'y a bien souvent aucune donnée existante avec laquelle comparer ces résultats. Un villageois dit qu'il a vu « les vautours s'aveugler et se brûler le poitrail tandis qu'ils survolaient un parc photovoltaïque ». On peut saluer son œil de lynx et cela peut sembler exagéré, mais non, on en est là ! L'environnementaliste se fait le relai d'une telle observation. Ensuite, il faut monter un rapport de recensement, évaluer le risque pour les vautours, récolter le plus d'informations tangibles possibles et prier pour que le délégué de l'État soit de bonne humeur le jour de la visite sans quoi le projet restera dans les cartons.

L'énergie solaire est-elle bon marché ?

Il faut distinguer deux cas de figure. Le plus courant tout d'abord. Si j'ai un contrat de fourniture d'électricité avec la compagnie utilitaire dans ma zone, l'impact de l'énergie solaire dans le mix électrique est transparent. Je vais de toute façon payer (ndlr : aujourd'hui 20/11/2021), environ 18 centimes d'euros par kWh. Pourquoi ? Parce que la provision d'électricité sur le réseau se fait de façon marginale : au besoin communiqué par le réseau, les centrales hydroélectriques, nucléaires, à charbon, à gaz, les parcs éoliens et photovoltaïques et les centrales hydrides répondent par leur prix de vente du mégawatt. Le prix le plus cher est retenu pour l'achat à tous les fournisseurs indépendamment de la provenance de leur électricité. En ce moment, il y a de fortes chances pour que ce soit celui du gaz. Cela motive évidemment le secteur industriel à développer des énergies renouvelables puisque les marges sont supérieures mais moi, consommateur final, je n'en ressens pas les effets immédiats sur ma facture.

Le deuxième cas pratique, pour lequel on peut effectivement parler d'un gain pour le consommateur final, est celui qui consiste à installer des panneaux solaires sur son toit. Une fois mon coût d'achat et d'installation amorti, je n'achète au distributeur local que ce dont j'ai besoin à 0,18 euros/kWh et lui revends à 0,04 euros/kWh mon électricité excédentaire. La différence constitue ma facture mensuelle. Si j'étais une entreprise avec un PPA (power purchase agreement) je pourrais la lui revendre au prix où il me la vend, lui, mais ce n'est pas le cas. Je peux donc effectuer des économies à terme si tant est que ma consommation soit globalement inférieure à la capacité de production sur mon toit.

Quel est le plus gros coût d'un parc photovoltaïque ?

La location des terres. Il faut comprendre que ces terres sont louées par des agriculteurs qui, bien souvent, se spécialisaient jusque-là dans la culture de céréales et pouvaient espérer entre 300 et 400 euros de revenus bruts annuels à l'hectare. Déduisez le coût du gasoil du tracteur, de l'entretien, etc., il ne vous reste plus grand chose. S'ils louent leurs terres aujourd'hui, et l'État les y encourage et nous encourage à construire des parcs photovoltaïques, on leur assure entre 1500 et 2000 euros bruts par annuels par hectare et ils n'ont absolument rien à faire. Le calcul est vite fait. Le reste n'est pas foncièrement cher : construire les panneaux et les installer ont un coût relativement marginal. Un parc de 50MW génère 6 millions d'euros par an, il faut deux ou trois personnes pour l'entretenir et la vie utile d'un panneau est de dix ans. C'est un bon business.

On se lance dans le solaire en Espagne par conviction ou parce que c'est un bon business ?

Absolument TOUS les acteurs industriels actuels que j'ai croisés ces dernières années y sont pour le gain avant tout. Cela me semble logique, on ne naît pas sensibilisé à la cause climatique et l'on apprend bien plus tôt l'importance de l'argent que celle d'un climat stable. On se convainc en chemin du bien-fondé de son travail, ce qui est vertueux dans tous les cas puisque le résultat est que l'Espagne se dote de plus en plus de panneaux solaires pour améliorer son mix électrique.

FOI EN LA TECHNOLOGIE

Pour certains experts comme Jean-Marc Jancovici, vulgarisateur de la cause du réchauffement climatique, renseigné et influent auprès d'une part grandissante de la population française notamment et de ses nouveaux ingénieurs, ce remplacement des énergies fossiles par les renouvelables ne peut s'effectuer sans la décroissance permanente de l'économie mondiale, de l'ordre de -5 % par an sur les prochaines décennies. Pour mémoire, la récession due à la crise sanitaire en 2020 est du même ordre de grandeur. Difficile d'atteindre la décroissance autrement qu'en l'imposant? Assurément, d'autant plus que la théorie et les faits avérés qui supportent une telle projection se heurtent inévitablement à une réalité : le besoin vital pour plus de

700 millions de personnes de sortir de l'extrême pauvreté et la volonté, pour les plus de sept milliards restants, d'améliorer sans cesse leurs conditions de vie.

Dans un tel contexte, il est normal que le secteur énergétique se tourne vers la technologie pour opérer sa transition et continue de poursuivre la croissance, comme les autres secteurs d'activité qui dépendent d'elle (tous sans exception!) L'IEA propose ainsi cette analyse : la plupart des réductions d'émissions de CO₂ jusqu'en 2030 proviendront de technologies déjà sur le marché tandis qu'en 2050, près de la moitié des réductions devront provenir de technologies aujourd'hui en phase de démonstration ou de prototype



Panneaux solaires sur le toit d'un particulier © osheaphotography



Simon Corbell 

Ancien vice-ministre en chef du Territoire de la capitale australienne, a inauguré en 2014 l'ouverture de la toute première installation de production

d'énergie solaire (*Royalla solar farm*) à être connectée au réseau électrique dans l'État capitale.

Son avis sur la transition énergétique : « Il faut raisonner en termes de besoins réels et de disponibilité des sources énergétiques pour une géographie donnée. L'Australie par exemple, a tout le vent et le soleil dont elle a besoin pour que sa production d'électricité soit entièrement basée sur les énergies renouvelables mais ce n'est pas forcément le cas d'un pays enclavé de surface moindre où le nucléaire peut probablement jouer un rôle ».

(pour atteindre la neutralité carbone en 2050).

L'adoption, ensuite, de ces (nouvelles) technologies est une question d'économies d'échelle. Les applications immédiatement observables sont liées à l'électrification des usages. Par exemple, le citoyen lambda décide de changer son véhicule personnel fonctionnant au diesel pour une voiture électrique lorsque celle-ci lui coûte moins cher à l'achat (elle est déjà plus économe en entretien et à la borne), il remplace son dispositif de chauffage au gaz par une pompe à chaleur (munie d'un convertisseur à moteur électrique) s'il réduit vite ses factures et rembourse son investissement. L'analyse est sensiblement la même pour celui qui place des panneaux solaires sur son toit et se connecte au réseau; si sa production est supérieure à sa consommation, il pourra revendre son électricité excédentaire à l'opérateur. Il est aussi plus enclin à changer ses habitudes si son manque à gagner initial est compensé par quelque programme incitatif. Pour certaines applications dans l'industrie ou l'agriculture enfin, où l'électrification ne pourra s'appliquer à toute la chaîne de production – comme la fabrication de l'acier ou du ciment, qui requièrent beaucoup de chaleur pour fondre minerais et matériaux, aujourd'hui possible grâce aux hydrocarbures – toute nouvelle route technologique empruntée suit le même principe : savant mélange de projections financières, risques techniques et choix géopolitiques. ►



Installation des fondations d'une éolienne en Mer du Nord © DJ Mattaar

Son anecdote de la transition énergétique : « Les Australiens sont très enthousiastes en ce qui concerne l'autoconsommation d'énergie solaire. On va devenir le premier pays dans lequel la moitié de l'électricité proviendra des toits des particuliers. Le surplus d'électricité crée d'ailleurs un défi pour l'infrastructure en place, laquelle a été pensée pour la délivrer et non pas pour la recevoir, ce qui met en évidence quelques problèmes de puissance et d'intensité du courant. On va en conséquence voir de plus en plus de maisons équipées de batteries au

lithium ou à l'hydrogène pour pallier au problème dans les années à venir ».

Ce qui lui donne foi en l'avenir : « Le Japon a demandé à ses industries lourdes de passer de l'importation de charbon et de gaz à celles d'hydrogène pour faire fonctionner son industrie lourde. Une grande partie des importations existantes proviennent d'Australie. Leur vision est claire, ils vont contribuer ainsi à changer notre comportement vis-à-vis de l'exportation de gaz et de charbon ».

Mobilité et transition énergétique



Du présent et du futur des voitures particulières avec Dominique Maignan, ancien responsable du développement des méthodologies d'essais pour la mise au point des moteurs Renault (diesel puis électrique) sur le site de Lardy, France.

Pouvez-vous résumer votre travail depuis 2014, date à laquelle vous avez pris les commandes des bancs d'essai ?

La mission principale de mon équipe et moi-même consistait à trouver les moyens de tester les moteurs thermiques puis électriques selon les standards de l'industrie automobile. La plupart des tests s'effectuent sur des bancs d'essai. Le moteur est mis en rotation, comme dans la voiture, il est placé dans un caisson et on le soumet à différentes contraintes (régime, couple, changements de pression et de température). Il doit ainsi passer des tests d'endurance et d'endommagement, etc. La tâche est assez différente lorsqu'il s'agit d'un véhicule électrique, dont on doit valider le moteur mais aussi la batterie et l'électronique de puissance qui lie l'un à l'autre. Thermique ou électrique enfin, toute voiture mise en circulation doit par exemple pouvoir franchir un gué de 40-50 cm, entre autres obstacles.

Vous avez connu deux révolutions au cours de votre carrière, celle du moteur diesel puis celle du moteur électrique. Cette dernière est-elle là pour rester ?

Oui, je le crois, en tous les cas pour les décennies à venir. Cela fait plus de 100 ans qu'on essaie d'améliorer les moteurs thermiques actuels mais les normes anti-pollution et d'émissions de CO₂ sont devenues tellement basses qu'on atteint désormais les limites physiques de nos moteurs et ce malgré l'invention d'artifices complexes et chers comme le filtre à particules. La révolution technologique du moteur électrique est bien plus vaste et prometteuse. Il ne faut pas oublier qu'en termes d'efficacité, un véhicule thermique consomme 30 % tout au mieux de l'énergie qui lui est fournie et perd véritablement les 70 % restants. Ce ratio est inversé dans le cas d'un véhicule électrique.

Pouvez-vous citer d'autres avantages, pour le consommateur notamment ?

Ils sont indéniables et le seront d'autant plus lorsque le coût d'acquisition d'un véhicule électrique sera moins cher que celui d'une voiture diesel (ndlr : d'ici à 5 à 15 ans dans l'UE selon les pays). Alors la liste deviendra toujours plus évidente : absence d'émissions de GES, silence, recharge dix fois moins chère, adieu les vidanges, démarrage au quart de tour même en hiver, un moteur qui ne cale pas et des coûts d'entretien bien inférieurs à ceux d'une voiture thermique. En effet, le moteur électrique ne comporte véritablement qu'une seule pièce en mouvement : le rotor. Avec des roulements bien lubrifiés, sa durée de vie est incomparablement plus longue que celle d'un moteur thermique, constitué quant à lui de plus d'une centaine de pièces qui se meuvent, s'usent donc plus vite et requièrent une maintenance plus intensive.

Des pistes d'amélioration des moteurs (et voitures) électriques actuels ?



Le moteur électrique R135 de la Zoé de Renault ©renault.fr

Réduire le poids des batteries (ndlr : aujourd'hui 250-300 kg selon la voiture). Tous les constructeurs y travaillent. Réduire le temps de charge (ndlr : autorisant une charge allant jusqu'à 250 kW, la Model 3 de Tesla peut récupérer 80 % de charge en une trentaine de minutes tandis que des modèles moins chers des compétiteurs, plus abordables, nécessitent plutôt une quarantaine de minutes pour une charge partielle). On peut enfin mentionner le recyclage des batteries, sujet encore peu traité car jugé moins urgent que d'autres. Ce n'est pas un processus aisé. Il faut séparer beaucoup de composants par bains chimiques successifs après le broyage. La filière du recyclage s'y prépare pour les décennies à venir (ndlr : selon l'Institut des futurs durables (ISF) à l'Université de technologie de Sydney, le recyclage réussi des batteries réduirait la demande mondiale de 25 % pour le lithium, 35 % pour le cobalt et le nickel, et 55 % pour le cuivre d'ici à 2040).

Y aura-t-il une (des) révolution(s) du moteur électrique à l'instar de celles qui ont permis de remplacer le moteur essence par celui qui fonctionne au diesel ?

Oui, elles sont déjà en cours notamment sur la chimie des batteries pour réduire l'utilisation de métaux rares comme le Cobalt et le nickel. Mais aussi dans l'électronique de puissance, cet ensemble complexe qui permet de transformer le courant continu de la batterie en courant alternatif à haute fréquence pour le moteur, les dernières avancées sont en soi de petites révolutions. Je pense aussi qu'on s'oriente vers des technologies usant chaque fois moins de lithium pour ne pas en dépendre ; grande partie des terres d'où on peut l'extraire et leur exploitation étant aux mains

d'une poignée de pays (ndlr : Chine, Australie, Chili, États-Unis). Dans le même ordre d'idée, Renault essaie de s'affranchir de la technologie asiatique des aimants permanents et travaille à l'amélioration d'un moteur contenant en plus des bobines du stator, un rotor lui-même bobiné dans lequel on envoie un courant, créant ainsi un champ magnétique qui remplace celui des aimants. Pas facile cependant d'envoyer un courant dans une pièce en mouvement. Dans tous les cas, qui dit bobines dit cuivre, ça... on n'y coupera pas!

Une avancée technologique à propos de laquelle vous êtes enthousiaste ?

Pour revenir au thème de la recharge, je pense que celle à induction magnétique en roulant est possible et pourrait être déployée dans un premier temps sur des portions d'autoroute à l'échelle d'un pays. En faisant circuler un courant électrique à travers une bobine placée sous la route, on crée un champ magnétique dont l'action entraîne l'apparition d'un nouveau courant électrique au niveau d'une seconde bobine distante. On peut ainsi transférer de l'électricité de la route à la voiture sans contact. Les applications courantes de la recharge par induction exigent tout de même que le chargeur et le récepteur soient situés à proximité immédiate l'un de l'autre. (ndlr : en septembre 2020, la startup israélienne ElectReon a ainsi équipé une portion de route à Tel-Aviv et d'autres projets sont en cours, notamment en Allemagne).

Que pensez-vous de l'hydrogène ?

Je pense qu'il faut avant tout différencier le moteur thermique fonctionnant à l'hydrogène du moteur électrique alimenté par une pile à combustible transformant cet hydrogène en électricité. L'industrie a sûrement déjà fait son choix en faveur de la seconde option mais ce sont des technologies qui ont 20 ans de retards sur la batterie au lithium, qui n'a cessé de s'améliorer ces dix dernières années. En 2012 : la première batterie de la Zoé avait une capacité de 22 kWh soit 200 km d'autonomie dans de bonnes conditions. Sur le dernier modèle, on est plutôt aux alentours de 50 kWh soit près de 500 km d'autonomie. Et son coût de production n'a pas augmenté.



Le temps d'une course en Uber (électrique) à Lisbonne

À l'approche des fêtes, depuis quatre ans, ma voiture à moteur thermique, vieillissante, me rappelle systématiquement l'importance de lui faire plaisir pour Noël. Cette année, surestimant mes moyens financiers, elle suggère que nous changions son filtre à particules... et j'ai déjà mal au bras que je vais devoir laisser en échange à mon garagiste. En ce lundi matin, je pousse donc la porte de sortie de Feu Vert, le moral tout au fond de mes baskets, et commande un Uber. Lucimara, tout sourire derrière son masque, m'accueille dans sa Zoé modèle 2016, achetée neuve en 2019. Elle m'explique les avantages et les inconvénients de son véhicule.

Sa facture la plus douloureuse consistera à devoir remplacer sa batterie l'année prochaine puis environ tous les trois ans au rythme de ses courses. « Il faut tout de même compter 3000 euros par unité neuve », me

confirme-t-elle avant d'insister sur le fait qu'avant la crise sanitaire, les mesures gouvernementales visant à encourager l'achat de véhicules électriques au détriment de leurs ancêtres thermiques étaient telles que la recharge était gratuite dans tout le Portugal ! Ce n'est plus le cas depuis 2020 mais Lucimara est néanmoins satisfaite de son choix : son précédent outils de travail, de taille similaire, lui coûtait 650 euros en diesel par mois. Elle a réduit sa facture de 500 euros depuis qu'elle est passée au tout électrique et que les autorités ne peuvent plus se montrer si généreuses. $500 \times 12 = 6000$, fin 2019, Lucimara avait donc déjà économisé l'équivalent de deux batteries neuves pour les six prochaines années.

Le temps de chargement reste problématique. Il faut compter 40 min pour une charge « rapide » permettant de faire une cinquantaine de kilomètres en ville. Le soir, Lucimara s'assure de laisser son véhicule branché à une borne dite lente pour faire le plein pendant la nuit : 8 h pour environ 200 kilomètres. « C'est sûr qu'il faut anticiper ses besoins en permanence et les voyages longs sont à proscrire », remarque-t-elle. Elle utilise l'application MIIO pour localiser les bornes disponibles dans les parages et regrette que les tarifs ne soient pas les mêmes selon qu'on se branche à la station-service en bas de son immeuble (0,015 euro/min) ou aux mêmes bornes lentes du parking du supermarché d'en face (0,008 euro/min). Pour le coup, à l'instar de ce qui différenciait un diesel premium d'un gasoil de base, il ne peut être question ici de qualité de l'électricité...

Elle aimerait aussi que les prises soient universelles afin de se connecter à ces bornes semi-rapides auxquelles se branchent toutes les Tesla du coin. Malheureusement, la pauvre Zoé ne le supporterait pas — différences de technologie des constructeurs et de puissance obligent — mais cette requête reste légitime.

Lucimara apprécie enfin, outre le silence de son habitacle, la facilité à se garer. Les places équipées de bornes électriques ne manquent pas dans le centre-ville de Lisbonne et elles sont systématiquement mieux situées que les places traditionnelles — juste à côté de celles réservées aux handicapées et aux femmes enceintes, proches des sorties et des entrées des centres d'intérêt économiques et culturels. Une autre mesure visant à encourager l'achat de ces voitures individuelles.

Lucimara ne reviendra pas en arrière et elle sourit à nouveau, toujours derrière son masque, pour la photo cette fois.



Parc éolien de Forestalia à Monforte, Teruel © Jesús Ochoa

LA DIVERSIFICATION DU MIX ET DE LA PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE AU CŒUR DES STRATÉGIES ÉCONOMIQUE, POLITIQUE... ET ENVIRONNEMENTALE

La répartition des sources d'énergie façonne le monde. Les États poursuivent la « souveraineté » ou indépendance énergétique, qu'elle se traduise dans la provenance de leurs sources primaires, la production de leurs carburants ou la génération de leur électricité. L'inégale répartition de ces ressources, le besoin de croissance des nations et les échanges commerciaux qui en découlent font de cette indépendance une chimère. Certains pays tendent cependant à s'en rapprocher à l'instar de l'Islande, qui importe désormais peu d'hydrocarbures et dont l'industrie, les transports et constructions consomment 75 % de leur énergie sous forme de chaleur ou d'électricité provenant d'installations géothermiques ou hydroélectriques locales. À l'inverse, la consommation énergétique de la Grèce repose presque exclusivement sur l'importation d'hydrocarbures tandis que l'Europe dans son ensemble importe plus de 40 % de son gaz de Russie.

Diversifier son mix (ses sources d'énergie) et sa production, donne aux États la possibilité de se retourner en cas de mauvaise conjoncture économique ou géopolitique. Le besoin de relancer l'économie au sortir de la crise sanitaire révèle l'importance de ne pas mettre tous ses œufs dans le même panier et surtout, de ne pas en retirer certains trop vite ! L'Allemagne se demande aujourd'hui si elle n'aurait peut-être pas dû sortir du charbon avant de sortir du nucléaire. Rappelons qu'Angela Merkel avait satisfait grande partie de sa population en 2011 (année de la tragédie de Fukushima) en annonçant la fin de l'atome dans son pays. Les dernières centrales nucléaires allemandes encore en activité devraient s'arrêter l'année prochaine tandis que la sortie du charbon n'est pas envisagée avant 2035, ce qui risque de compliquer l'atteinte des objectifs nationaux de réduction de CO₂. Les conséquences des scandales et des catastrophes ponctuels restent en effet mieux ancrés dans les esprits et orientent plus facilement l'agenda politique que les phénomènes à long terme. L'OMS alerte sur la pollution de l'air qui tue 7 millions de personnes par an dans le monde... mais les centrales nucléaires font plus peur que la



fumée noire et ferment sous le poids de l'opinion publique – aujourd'hui, encore nécessairement à la faveur du charbon ou du gaz. Ainsi, dans l'État de New York, le dernier réacteur d'Indian Point à finalement été arrêté et la centrale, d'une puissance de 1000 MW, a fermé ses portes en avril 2021 plusieurs années avant sa fin de vie annoncée sous la pression de groupes environnementaux. Elle produisait de l'électricité décarbonée à 40 km de Manhattan. Trois centrales à gaz ont depuis été mises en service pour pallier son arrêt...

Dans un élan d'anticipation, l'Arabie Saoudite, troisième producteur et premier exportateur de pétrole



Tours aéroréfrigérantes d'une centrale nucléaire © Ribeiro Bruno

au monde, se lance dans la production d'hydrogène afin de réduire sa dépendance aux pétrodollars. La centrale de 4 gigawatts de son projet Helios Green Fuel, qui sera entièrement alimentée par l'énergie éolienne et solaire du désert, serait la plus importante connue à ce jour et devrait permettre de fabriquer de l'hydrogène destiné à l'exportation. La diversification de la production peut aussi permettre de maintenir sa position de force sur la scène internationale tout en satisfaisant l'opinion publique de ses futurs clients. Certes, il faut en avoir les moyens ou se les donner. Une chose est sûre, la transition énergétique est bien en marche au profit des renouvelables et il faut s'en féliciter.



Centrale (électrique) géothermique, Hellisheidi, Islande © Johann Helgason

Les bons carbone

Il existe des marchés dits régulés de bons carbone ou « quotas d'émissions » comme celui de l'UE, mis en place depuis la ratification du Protocole de Kyoto en 2005, où un bon de carbone (équivalent à une tonne de CO₂) s'achète et se vend à plus de 65 euros (en novembre 2021). Il en existe d'autres, en Australie, en Nouvelle-Zélande et dans certains États américains par exemple. Le principe reste le même : une entité publique (l'UE, un État) impose à ses industriels les plus polluants des quotas de CO₂ inférieurs à leurs taux d'émissions actuels. Ceux qui ne parviennent pas à réduire leurs émissions doivent compenser par l'achat de bons carbones auprès de ceux qui y parviennent ou de ceux qui peuvent émettre des bons carbone.

Les entreprises sur ces marchés régulés se comptent par dizaines de milliers, laissant de côté des centaines de milliers d'autres qui souhaitent aujourd'hui réduire leurs propres émissions ou aimeraient vendre les tonnes de CO₂ qu'ils parviennent à capturer de par la nature de leurs activités (installations forestières et producteurs d'énergies renouvelables en tête). Ces entreprises se sont rapprochées les unes des autres indépendamment de leur géographie pour acheter et vendre librement des crédits de tonnes de carbone à un tarif variable qui dépend de l'offre, de la demande et du « charisme » des projets concernés. C'est le « marché volontaire », sur lequel le prix de la tonne de CO₂ est d'environ 5 dollars (moyenne pondérée) à ce jour en 2021.

Interview

Alvaro Perez del Castillo est le directeur général de Carbosur, une entreprise uruguayenne fondée en 2000 qui conseille les professionnels et particuliers désireux de mesurer, réduire et neutraliser leur empreinte carbone. Carbosur achète et vend des bons carbone sur le marché volontaire.



Le marché volontaire a le vent en poupe mais ça n'a pas toujours été le cas...

Ce n'est rien de le dire ! Il y a quatre ans, un crédit d'une tonne de CO₂ valait moins de 0,5 dollars. Certaines des entreprises que nous avions alors conseillées avaient investi en VCU (ndlr : Verified Carbon Units, bons carbone sur le marché volontaire), ont ensuite vendu leurs actifs et la valeur des VCU associée considérée nulle. Cette année, Carbosur a vendu près de 9 millions de tonnes de carbones. On n'a pas pu en vendre plus parce qu'on n'en avait plus !

Quel est le profil type de l'acheteur ?

De plus en plus, ce sont des entreprises convaincues du bien-fondé de la réduction de leur empreinte carbone. Sinon, nous sommes abordés par toutes sortes de clients, depuis ce joueur de tennis célèbre dont je dois taire le nom, qui souhaite compenser l'empreinte carbone de son jet privé, à la banque Santander ou au concessionnaire Hyundai d'Uruguay, qui vend désormais certains de ses modèles avec un « certificat de retrait », c'est-à-dire, par exemple, que l'émission de CO₂ des 10 000 premiers kilomètres parcourus est d'ores et déjà compensée par l'achat de VCU. Les derniers Jeux olympiques aussi ont compensé les 2 millions de tonnes de CO₂ émises cet été.



Forêt d'eucalyptus © P.V.R Murty

Où et comment présenter un projet? quelle est la méthodologie à suivre pour vendre ou acheter des VCUs?

Les projets peuvent se porter candidat à différents registres, les plus connus étant Verra (programme VCS) et Gold Standard. On doit se conformer aux exigences de leurs cahiers des charges afin d'obtenir leur Approbation (ndlr: processus qualitatif) et la Vérification (ndlr: processus à travers lequel le montant des crédits générés par chaque projet est quantifié). Entre autres, les processus de Validation et de Vérification nécessitent la visite d'un auditeur assermenté, qui vérifie que les informations partagées reflètent la réalité et accepte ou rejette la candidature. Ces standards sont très strictes, ils sont nés pour éviter la fraude, courante il y a quelques années.

Qu'entend-on par projets «charismatiques»?

Ce sont ces installations qui cochent toutes les cases en plus de capturer du CO₂ : considérations sociales, environnementales, anthropologiques. Les plantations forestières commerciales ne cessent à ce titre de gagner en prestige tandis que des projets d'hydroélectricité de grande envergure sont chaque fois moins cotés (ndlr : ils peuvent requérir le déplacement de populations et l'inondation d'écosystèmes existant sans compter l'impact carbone de leur construction). On trouve ainsi des VCUs à 1-3 dollar(s) venant de barrages construits en Chine et d'autres à 8 dollars provenant de forêts d'Amérique latine. Acheter VCUs d'un parc amazonien pour le protéger et démontrer qu'il aurait sans cela souffert de déforestation à un rythme de X % par an, est un projet charismatique.

L'hydrogène

L'hydrogène est l'élément le plus abondant de l'Univers, le principal composant des étoiles et des planètes gazeuses. Il est rarement à l'état pur (H ou H₂), majoritairement combiné avec d'autres atomes tels que l'oxygène dans l'eau ou le carbone dans les hydrocarbures. Le dihydrogène (H₂), mal-nommé « hydrogène » lorsqu'on aborde la transition énergétique, est à l'état gazeux à température ambiante et se liquéfie à -253°C. Le dihydrogène n'est pas une énergie en soi mais plutôt un vecteur dans la mesure où il la transporte, au même titre que l'électricité.

Son utilisation par l'homme n'est pas récente. On le retrouve dans de nombreux procédés industriels et chimiques; il sert notamment à la désulfuration du pétrole et la fabrication d'ammoniaque et de méthanol, ces applications représentant à elles trois le gros du marché de l'hydrogène estimé à 130 milliards de dollars en 2020.

Aujourd'hui, le dihydrogène est principalement obtenu par l'action de la vapeur d'eau et de la chaleur sur le méthane (CH₄), dont les atomes se séparent et se réarrangent en dihydrogène (H₂) et dioxyde de carbone (CO₂). C'est donc un procédé plus ou moins polluant selon que l'on capte (hydrogène bleu) ou non (hydrogène gris) les molécules de carbone ainsi émises. L'hydrogène (H₂) peut également être obtenu par électrolyse de l'eau (H₂O), technique qui n'a donc pour autre émission que des molécules d'oxygène, on parle alors de production d'hydrogène vert, qui a logiquement la faveur des industriels et des États devant les enjeux de la transition énergétique.

Interview de Sébastien Paillat



En 2021, Sébastien Paillat a cofondé FiveT Hydrogen AG avec Pierre-Étienne Franc, ancien vice-président d'Air Liquide et d'autres associés du secteur énergétique. Ensemble et avec l'appui d'Air Liquide, Total Energies et VINCI, en partenariat avec Ardian

(private equity), ils viennent de lancer Hy24, le plus grand fonds mondial dédié au développement de projets d'hydrogène décarboné.

Pourquoi parlez-vous sur l'hydrogène ?

Il peut servir d'importantes applications de la transition énergétique, notamment dans l'industrie lourde où l'électrification ne répond pas à tous les défis techniques et pour le stockage des énergies renouvelables, façon de pallier à leur intermittence, d'où le nom



du fond par ailleurs : « Hy24 » pour « énergie disponible 24 h sur 24 h » grâce au dihydrogène vert.

Aussi, l'hydrogène peut être injecté en proportion minoritaire dans les tuyaux d'alimentation au gaz naturel pour améliorer leur densité énergétique. C'est une étape vers le remplacement par l'hydrogène dans le chauffage de certaines villes en Corée ou au Japon par exemple, où le phénomène est déjà en cours.

L'hydrogène est enfin une solution pertinente qui s'accorde avec la mobilité électrique, en particuliers dans les transports lourds et intensifs (logistique du dernier kilomètre, taxis), où le véhicule hydrogène peut être plus compétitif en prix et performance que le

véhicule électrique à batterie. Un véhicule hydrogène est d'ailleurs un véhicule à moteur électrique, dont on a remplacé les batteries par un réservoir d'hydrogène et une pile à combustible qui transforme l'H₂ en électricité, technologie mature qui est le procédé inverse de l'électrolyse.

Les futures unités de production d'hydrogène vert peuvent être construites dans des bassins industriels existants. La traçabilité de ce genre de projets est encore incomplète, ils passeront donc forcément par une phase de transition incluant un petit pourcentage d'hydrogène bleu voire gris mais le train est lancé et l'Europe se positionne pour l'heure en leader sur le marché.

Quelle est votre stratégie d'investissement ?

On envisage entre 20 et 30 investissements dans les six ans à venir, à la fois dans la production d'hydrogène décarboné et dans la mobilité (ayant recours à l'hydrogène), minoritaires et à hauteur de 30 à 150 millions d'euros par *ticket* aux côtés des grands industriels qui nous soutiennent et de développeurs de projets, nous permettant d'acquérir une place au *board* des entreprises ainsi créées. Nos zones de prédilection sont l'Europe, l'Amérique du Nord et l'Asie pacifique (Japon, Corée et Australie). Nous nous sommes aussi donné les moyens d'être classés selon l'article 9 de la « taxonomie européenne » (ndlr : règlement européen 2020/852), ce qui est pour l'heure très rare parmi les fonds d'investissement et qui nous engage au respect de normes sociales, environnementales et de gouvernance particulièrement strictes.

Quelles sont vos certitudes concernant l'avenir de l'hydrogène ?

Je crois beaucoup au remplacement progressif des hydrocarbures dans le transport du lourd et dans certains processus industriels difficiles à décarboner. Je pense que d'ici 10-15 ans, l'hydrogène s'y sera fait une place de choix. Le covid, l'augmentation du prix du gaz (ndlr : car la différence de prix entre les deux commodités est chaque fois moins importante) et la recherche de souveraineté énergétique servent notre cause anisi que l'électrification des usages (ndlr : plus on a recours aux énergies renouvelables plus il faut gérer la question de leur intermittence et de leur stockage). ■



Energy Observer, premier navire à hydrogène autonome et zéro émissions © Ringo Chiu