

LE TEMPS DES ENR GLORIEUSES

**LES ÉNERGIES
RENOUVELABLES
AU SERVICE DE
L'INTÉRÊT GÉNÉRAL**



Syndicat
des énergies
renouvelables



L'ADN

Le temps des ENR glorieuses

•
Les énergies renouvelables
au service de l'intérêt général

ÉDITO

AYONS LES ÉNERGIES RENOUVELABLES HEUREUSES

À l'occasion de son 25^e colloque annuel, le Syndicat des énergies renouvelables (SER) a voulu confier à *L'ADN* – un média d'analyse des tendances et des mutations – le soin de présenter un regard éditorial indépendant et décalé sur les enjeux de la transition énergétique et de la production d'énergies renouvelables (EnR).

Rédigé par l'équipe éditoriale de *L'ADN* avec le soutien des équipes du SER, le numéro spécial que vous allez découvrir essaie de traduire dans un langage grand public, explicite et parfois débridé, l'écosystème d'un secteur professionnel dont le rôle est central pour atteindre la neutralité carbone.

Notre pays entretient en effet un rapport complexe avec son système énergétique. Souvent mal compris, et reposant à plus de 60% sur des énergies fossiles importées dont la production est invisible, complété par un parc nucléaire et un parc hydroélectrique dont la matérialité, excepté pour les riverains immédiats, est très limitée, il désincarne beaucoup la question de l'accès à l'énergie. Il entretient ainsi une forme d'«immaturité» qui conduit souvent à fermer les yeux sur les conséquences économiques, sociales, géopolitiques et environnementales

que constitue l'extraction sans fin des énergies fossiles. Or, la réalité est indiscutable. Nous ne pouvons plus continuer ainsi, et la seule manière de nous débarrasser de ces énergies fossiles passe par des efforts de sobriété et d'efficacité associés à la construction de nouvelles installations de production d'énergies renouvelables qui, forcément, se verront!

Est-ce un problème? Nous sommes convaincus du contraire, parce que sortir des énergies fossiles, c'est l'occasion de rendre durable le système de croissance hérité des Trente Glorieuses. La transition énergétique qui s'accélère nous offre une nouvelle chance de repenser notre modèle. Tout d'abord, grâce à la consolidation de notre souveraineté qui rendra notre système énergétique plus résilient, et moins exposé aux crises extérieures. Le pouvoir d'achat des Français et la compétitivité des entreprises en seront les premiers bénéficiaires. Ensuite, en créant de nouveaux métiers porteurs de sens et de responsabilité pour notre jeunesse grâce à de nombreuses innovations, en apportant de la richesse à nos territoires, ou en offrant des opportunités nouvelles à l'agriculture. Songeons un instant aux effets économiques de la production sur le sol national de l'énergie nécessaire pour remplacer les 60% de



JULES NYSSSEN

Président du Syndicat des énergies renouvelables (SER)

fossiles que nous importons chaque année. C'est considérable! Enfin, et surtout, parce que la réussite de la transition passe par une responsabilisation collective vis-à-vis de l'énergie. Et de ce point de vue, la visualisation des infrastructures devrait créer un rapport nouveau à l'énergie, et peut-être nous amener à avoir une conscience plus claire des conséquences de notre manière de la consommer.

Dans ce hors-série, vous trouverez donc :

- **un retour sur l'histoire du développement des EnR en France**, car l'histoire est toujours très éclairante pour comprendre le monde d'aujourd'hui,
- **des interviews d'experts et des focus**, sans langue de bois, pour questionner différents enjeux : le paysage, la conciliation entre développement des EnR et protection de la biodiversité, la concertation locale, le financement de la transition énergétique, etc.,
- **un regard prospectif sur les technologies qui pourraient changer la donne** (stockage,

hydrogène, etc.) et les métiers qui pourraient demain être ceux de nos enfants,

- **et plein d'autres choses encore!**

Ce hors-série n'est pas une compilation des visions du SER; il amène le lecteur à s'interroger sur un certain nombre de questions très concrètes comme le rapport au paysage (en cessant d'avoir les infrastructures honteuses dès lors qu'elles répondent à un enjeu social partagé), le rapport aux territoires (construit autour de nouvelles solidarités dans la répartition de la production d'énergie, notamment dans le monde rural), l'utilisation de l'espace alors que nous voulons renforcer souverainetés alimentaire et énergétique. Et plus généralement, il invite à considérer une nouvelle façon de produire de l'énergie en cessant d'utiliser celle que nous n'avons pas pour privilégier celle que nous pouvons produire, lorsqu'elle est disponible, en faisant le meilleur usage de la variabilité. Et il pointe notre possibilité d'agir à titre individuel, car le citoyen peut aussi devenir producteur d'énergie grâce à l'autoconsommation.

Je vous souhaite une très bonne lecture!



SOMMAIRE

P. 6

L'ALMANACH DES ENR

Il ne fallait pas passer
à côté !

P. 10

UNE BRÈVE HISTOIRE TRÈS FRANÇAISE DES ENR

P. 16

PARLEZ-VOUS COURAMMENT CONCERTATION LOCALE ?

5 conseils pour
réussir son projet
de développement
d'énergies renouvelables

P. 20

FINANCEMENT DU RENOUVELABLE DANS LE MONDE

Quel état des lieux à
l'instant T ?

P. 24

DEMAIN, TOUS PRODUCTEURS D'ÉLECTRICITÉ VERTE ?

La transition écologique
passera aussi par
les consommateurs

P. 28

NON

Toutes les infrastructures
énergétiques ne sont
pas moches

P. 30

MÉTIERS DU FUTUR

Broker solidaire d'énergie
excédentaire H/F et
chargé de planification
du foisonnement H/F

P. 32

SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE ET SOUVERAINETÉ ÉNERGÉTIQUE

Les liaisons fructueuses ?

P. 36

LES ENR, DE L'ÉNERGIE EN STOCK

P. 40

CONCILIER CLIMAT ET BIODIVERSITÉ ?

Bien sûr que c'est possible !

P. 46

5 INNOVATIONS QUE VOUS AVEZ PEUT-ÊTRE MANQUÉES

Et qui vont changer la donne

P. 50

LES FILIÈRES NON ÉLECTRIQUES

Un rôle essentiel dans
la transition énergétique

P. 54

RÉENCHANTER LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Citoyens et industriels
en première ligne

P. 58

QUIZ

Quel scénario de
transition écologique
êtes-vous ?

SOUVERAINETÉ ALIMENTAIRE ET SOUVERAINETÉ ÉNERGETIQUE

32

LES LIAISONS FRUCTUEUSES ?

Alors que des craintes se manifestent autour de l'autosuffisance alimentaire de la France, le monde agricole se voit également incité à produire de plus en plus

d'énergie verte pour limiter nos importations en énergies fossiles. Comment concilier deux activités qui paraissent entrer en concurrence ?

@Gabriel Jimenez

En France, on n'a pas de pétrole, mais on a des agriculteurs. 500 000 exploitants et coexploitants, pour être précis. Aujourd'hui, c'est sur eux que repose une partie non négligeable de la stratégie française en matière de souveraineté énergétique. À tel point que dans son rapport sur la décarbonation du secteur, le Conseil général de l'agriculture, de l'alimentation et des espaces ruraux (CGAAER) imagine un scénario dit des « énergiculteurs ». L'idée ? À l'horizon 2050, 80 % des exploitations agricoles produisent de l'énergie verte via des panneaux solaires, des méthaniseurs, des cultures de biomasse et de biocarburants, ou des éoliennes. Dans ce scénario, les agriculteurs augmentent leur autonomie énergétique (la consommation d'énergie représente jusqu'à 25 % de leurs charges), mais aussi diversifient leurs revenus en vendant le surplus d'énergie et contribuent dans le même temps à la transition énergétique du pays. Un immense défi dont certains redoutent qu'il vienne dangereusement concurrencer un autre enjeu majeur des années à venir : la souveraineté alimentaire hexagonale.

Car, si la France s'est toujours considérée à juste titre comme une grande nation agricole, les crises successives du Covid et de la guerre en Ukraine ont montré ses failles dans le domaine de l'autosuffisance alimentaire. La dépendance à des pays extra-européens est de plus en plus marquée pour l'importation de denrées alimentaires et surtout d'engrais azotés, lesquels proviennent à 80 % de l'étranger. « Certaines filières voient leur taux d'approvisionnement se dégrader, soit en raison d'une hausse de la consommation domestique (riz, viande de volaille, fruits tropicaux, produits de la pêche et de l'aquaculture, en particulier saumon et crevettes), soit en raison d'une production locale en diminution (blé dur, pommes de terre) », détaille ainsi un rapport du gouvernement de mars 2024, qui révèle dans l'ensemble « des zones de fragilité préoccupantes ». Des fragilités renforcées par un contexte géopolitique instable et un dérèglement climatique qui ne cesse de tirer à la baisse les rendements de la production agricole.

Dans ces conditions, les agriculteurs peuvent avoir le sentiment de se retrouver à la croisée des chemins. Doivent-ils sacrifier leur production agricole au profit d'une production d'énergie renouvelable plus rentable ? Les surfaces agricoles dédiées aux panneaux photovoltaïques, à la production de biomasse ou de biocarburants vont-elles entrer en concurrence avec les surfaces destinées à la production alimentaire ou au fourrage pour les animaux ? Comment partager la valeur produite par ces énergies renouvelables de manière équitable auprès de tous les agriculteurs ?

Bref, malgré leur attrait évident, les énergies renouvelables suscitent de multiples craintes légitimes au sein du monde agricole.

LA MÉTHANISATION : AU-DELÀ DES CONTROVERSES, QUELLE RÉALITÉ SUR LE TERRAIN ?

Historiquement, les agriculteurs ont commencé à produire de l'énergie via la méthanisation, c'est-à-dire la transformation de matières organiques comme les déchets en gaz renouvelables. La France soutient le développement des unités de méthanisation depuis 2002 pour la valorisation en cogénération (chaleur et électricité) et 2011 pour l'injection de biométhane dans les réseaux de gaz naturel. Avec un développement exponentiel au cours de ces dernières années, la méthanisation a dû faire face à un certain nombre de critiques, qui ont permis de faire évoluer le cadre juridique dans un sens positif.

« Contrairement à l'Allemagne, qui utilise une grande part de cultures alimentaires dans son mix d'intrants pour la méthanisation, le modèle de la méthanisation à la française valorise une diversité de biomasses différentes, s'appuyant sur une large typologie d'installations », note Robin Apolit, responsable géothermie et chargé de mission gaz renouvelables pour le Syndicat des énergies renouvelables. En France, on utilise donc un mélange composé à 40 % d'effluents d'élevage et à 30 % de CIVE (cultures intermédiaires à vocation énergétique), c'est-à-dire des cultures implantées et récoltées entre deux cultures principales dans une rotation culturale. À cela est ensuite ajouté un assemblage variable de déchets agroalimentaires, déchets ménagers, ou encore déchets « verts ».

Depuis un décret de 2016, les cultures alimentaires pour l'énergie sont restreintes à 15 % en tonnage dans les méthaniseurs par année civile, « mais les études démontrent qu'en réalité elles se cantonnent plutôt à 5 % du tonnage des installations de biométhane », précise l'expert du SER. Concernant le foncier agricole, la loi APER du 10 mars 2023 contient un article qui prévoit que, pour qu'une activité de production de biogaz par méthanisation puisse être considérée comme une activité agricole, celle-ci doit être exploitée par un exploitant agricole ou par une structure détenue majoritairement par des agriculteurs.

L'ÉPANDAGE DU DIGESTAT : UN IMPACT SUR LES SOLS ENCORE À DÉTERMINER

Enfin, les conséquences de la méthanisation sur la qualité agrologique des sols peuvent s'étudier sous deux angles.

33

Tout d'abord, il faut prendre en compte l'impact positif des CIVE. « Leur système racinaire demeure dans le sol et apporte des minéraux bénéfiques aux sols », analyse Robin Apolit, du SER. Mais surtout, le remplacement des engrais de synthèse par l'épandage du digestat nécessite le développement d'analyses poussées sur son véritable impact, car peu d'études sur le sujet ont été publiées. À ce sujet, le spécialiste rappelle que le digestat est considéré comme un déchet, ce qui signifie qu'il ne peut être valorisé agronomiquement qu'en faisant l'objet d'un plan d'épandage précis et réglementé, qui prenne en compte les distances seuils par rapport aux tiers, aux cours d'eau, aux lieux de baignade, etc ».

Des efforts restent donc à fournir en matière de connaissances scientifiques sur le digestat et de cadre réglementaire (notamment sur les niveaux de tarifs d'achat de l'électricité et du biométhane), mais les objectifs fixés par la filière sont prometteurs: 20% de gaz renouvelable dans le mix d'ici 2030, soit une production de 70 TWh, ce qui représente l'équivalent de nos importations de gaz russe. Puis 100% de gaz renouvelable d'ici 2050, en parallèle avec une baisse de la consommation de gaz par les Français jusqu'à 320 TWh. Fin 2023, la filière méthanisation comptait 1920 installations qui produisaient au total 9,1 TWh de biométhane, 9 TWh de chaleur renouvelable et 3 TWh d'électricité.



©Vinicius Vieira

image associée aux anciennes centrales au sol: « On pouvait y développer des activités d'écopâturage pour les élevages bovins, mais il n'existait pas une logique consistant à pérenniser l'activité agricole. Il fallait clarifier tout ça en définissant le concept de l'agrivoltaïsme comme une installation de production électrique qui doit apporter un service direct à la production agricole. C'est un principe de coactivité avec une priorisation de la production agricole qui doit être respectée. » Cette définition est désormais devenue officielle depuis la loi APER, clarifiée ultérieurement par un décret d'avril 2024, mettant l'accent sur une obligation de résultat en matière de rendement minimum sur ces terres, tout en limitant leur part sur l'exploitation à 40% de la superficie totale du terrain.

Ce décret est le fruit d'un long travail de concertation et de compréhension mutuelle des enjeux entre les deux mondes de l'agriculture et de l'énergie. « Il faut du temps pour s'approprier le sujet, y compris sur le volet réglementaire, remarque Carole Mathieu. Les briques sont posées, on en discute avec plus d'aisance dans les chambres d'agriculture, mais la confiance n'est pas totale et les premiers projets d'agrivoltaïsme doivent être exemplaires. La crédibilité de la filière se joue ici, avec des objectifs de maintenir au maximum les rendements. »

DU PHOTOVOLTAÏQUE AU SOL À L'AGRIVOLTAÏSME, UN CHANGEMENT DE PARADIGME AU SERVICE DE L'AGRICULTURE

Aux débats sur la méthanisation se sont peu à peu agrégés ceux sur le photovoltaïque (PV). Principale pomme de discorde entre la filière agricole et la filière énergétique? Le foncier agricole à convertir en panneaux photovoltaïques au sol, qui pourrait rogner sur des surfaces potentiellement cultivables un jour, en vue d'une plus grande souveraineté alimentaire. Du côté de l'ADEME et du SER, on tempère cette crainte en rappelant que les surfaces nécessaires représentent à peine 0,5 à 1% des surfaces agricoles. Des chiffres d'autant plus modestes que le Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux estime que sur les dix dernières années, 20 000 hectares par an de terres ont été délaissés en France, un vaste potentiel qui s'ajoute à toutes les terres incultes déjà présentes. Au bout du compte, tout projet d'installation de PV au sol doit être validé par les chambres d'agriculture, seules à même de faire ce travail d'identification des surfaces éligibles.

Pour Carole Mathieu, directrice des affaires publiques chez TSE, entreprise référente dans le photovoltaïque et l'agrivoltaïque, ces polémiques sont nées de la mauvaise



DOIT-ON SACRIFIER NOTRE PRODUCTION AGRICOLE AU PROFIT D'UNE PRODUCTION D'ÉNERGIES RENOUVELABLES PLUS RENTABLE? COMMENT PARTAGER LA VALEUR PRODUITE DE MANIÈRE ÉQUITABLE? MALGRÉ LEUR ATTRAIT ÉVIDENT, LES ENR SUSCITENT DE MULTIPLES CRAINTES AU SEIN DU MONDE AGRICOLE.

DE PREMIERS SITES PILOTES ATTENTIVEMENT SUIVIS

Chez TSE, on a pris la mesure de ce virage important bien avant la loi. Après avoir géré l'installation de panneaux photovoltaïques sur toiture dans les années 2010, l'entreprise a repensé les solutions qu'elle propose dans cette optique de co-usage des sols. « Ce sont des solutions pensées pour l'agriculture, précise Carole Mathieu, conçues à partir de critères chiffrés sur les rendements agricoles et les revenus des agriculteurs. » Concrètement, ces solutions ont pris la forme d'une canopée, des panneaux photovoltaïques suspendus à 5,50 m du sol afin d'assurer la compatibilité totale avec le passage des engins agricoles. Les panneaux sont mobiles et s'orientent en fonction du soleil et des besoins de la plante, grâce à des trackers intelligents. « On cherche les points d'équilibre optimaux pour une production à la fois énergétique et agricole », résume la directrice des affaires publiques.

Parmi les différents services rendus aux cultures, l'agrivoltaïsme permet une protection contre les événements climatiques extrêmes, comme les gelées, les averses de grêle, ou les canicules. Mais il permet aussi le maintien durable des conditions d'humidité, à l'image de la canopée installée par TSE sur le site pilote de Verdonnet en Côte-d'Or. À l'origine du projet? Quatre agriculteurs regroupés dans une société civile d'exploitation agricole (SCEA) et soucieux d'augmenter les rendements de certaines terres superficielles. Grâce à l'ombre de la canopée, leurs cultures de blé devraient se dessécher moins vite que celles de la parcelle témoin sans panneaux photovoltaïques cultivée à côté. Dans un article du *Bien Public*, Jean-François Cortot, l'un des agriculteurs, constate déjà de bons résultats sur la pousse du blé et sur le bien-être des animaux. Ses moutons profitent ainsi régulièrement de l'ombre et des courants d'air créés par la canopée, sous laquelle

la température peut être inférieure de 2 ou 3 °C, selon lui. En tout, la production électrique des panneaux pourra répondre à la consommation électrique de 1450 habitants, de quoi offrir un revenu stable à long terme aux agriculteurs.

Même si les premières conclusions des études sont prometteuses, il reste encore des défis de taille à relever, à commencer par la lenteur des services instructeurs de l'État. Résultat: les temps de développement des projets s'allongent jusqu'à trois ou cinq ans, d'autant plus qu'ils se heurtent aux innombrables retards de raccordement à un réseau saturé, incapable pour l'instant d'absorber cette nouvelle production sans passer par une nécessaire modernisation. Autre sujet majeur, celui du partage de la valeur. « Le débat a basculé sur ces enjeux non réglementés, reconnaît Carole Mathieu. Comment faire pour que l'exploitant des centrales solaires ne soit pas le seul à en tirer des bénéfices? Il y a une forme d'injustice dans le choix des projets éligibles: On ne mettra pas du PV partout, car il reste seulement 80 GW de production électrique à trouver, soit moins de 0,5% des surfaces. » Dans ces conditions, il devient impératif de chercher une forme d'équilibre dans la redistribution des revenus du photovoltaïque. « Chez TSE, on développe des partenariats de codéveloppement avec des coopératives agricoles, explique Carole Mathieu. Les revenus perçus par la coopérative sont redistribués aux membres sur tout le territoire. »

LES ENR : DE L'ÉNERGIE EN STOCK

36

Les énergies renouvelables, ça ne se stocke pas. Alors, ça ne sert à rien ? Faux ! Non seulement la

flexibilité du marché de l'électricité permet de compenser leur variabilité, mais les innovations technologiques ne

cessent de repousser les limites en matière de stockage.

©Mitchel3uo

Dans la bouche de nombreux détracteurs des énergies renouvelables, celles-ci ne sont que des « intermittents du spectacle » énergétique : incapables de répondre à une demande d'énergie en continu. En réalité, ce terme d'« intermittence » est biaisé, voire utilisé avec mauvaise foi. Notamment parce que les principales sources de l'énergie renouvelable consommée en France à l'heure actuelle sont la biomasse et l'hydraulique : des énergies qui ne présentent pas du tout ce caractère de volatilité.

DES ÉNERGIES CERTES VARIABLES, MAIS DE PLUS EN PLUS PILOTABLES GRÂCE AU STOCKAGE

L'éolien et le solaire sont en effet soumis à des contraintes de variabilité, puisqu'ils dépendent de la météo. Mais comme le rappelle Philippe Alexandre, conseiller technique Business & Innovation chez ENGIE Green, ces contraintes ne sont pas insurmontables : « Ce sont des énergies variables mais prévisibles. Ces données sont exploitées par les gestionnaires de réseau, qui y injectent les électrons verts en priorité. » Bref, les EnR sont bel et bien pilotables, notamment parce que les centrales solaires et éoliennes sont réparties sur tout le territoire. Un foisonnement qui permet d'équilibrer le réseau en fonction du niveau de production des différentes régions. Et ce n'est pas tout : les deux filières sont complémentaires, puisque la plupart du temps les périodes de soleil et de vent se succèdent de façon harmonieuse. Auteur et analyste spécialisé dans les énergies renouvelables, Cédric Philibert nous confirme que « le mix entre l'éolien et le solaire est très important, car il évite d'avoir à stocker beaucoup d'énergie d'une saison sur l'autre ».

Il serait toutefois illusoire de croire que tout va bien. La part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie¹ en France est appelée à augmenter drastiquement pour passer de 22%² aujourd'hui à un objectif de 33% d'ici 2030. Dans un double contexte d'électrification de nos usages (mobilité, chauffage, climatisation...) et de volatilité accrue de la production, le stockage de cette énergie va devenir la donnée stratégique d'un réseau électrique de plus en plus complexe. Ce dernier va faire face à deux défis majeurs. D'abord, équilibrer le réseau en temps réel grâce à des systèmes de stockage intelligents capables d'ajouter ou de soutirer de l'électricité en quelques millisecondes. Ensuite, stocker de l'électricité à long terme – plusieurs semaines ou mois – afin d'éviter les *dunkelflaute*. Derrière ce mot allemand se cachent ces épisodes saisonniers de quelques semaines où le soleil et le vent se font rares en Europe, généralement autour du mois de février.

ENTRE INNOVATION TECHNOLOGIQUE ET BAISSÉ DES COÛTS, L'INCROYABLE ÉVOLUTION DES BATTERIES

Voilà pour le temps long. Le stockage à court terme repose, quant à lui, presque exclusivement sur les batteries. Stationnaires et raccordées à une centrale de production d'électricité ou bien embarquées, elles ont connu plusieurs bonds en avant technologiques ces dix dernières années. Leur prix, leur durée de vie, leur rendement, leur empreinte écologique : autant d'éléments qui ont évolué dans le bon sens, même si des progrès restent à faire. Dans un premier temps, le prix des batteries au lithium s'est effondré grâce au développement de la voiture électrique, puis ce sont les batteries stationnaires qui ont évolué à leur tour pour se démocratiser chez les producteurs d'électricité. Pour pallier les problèmes éthiques et écologiques posés par l'utilisation du lithium, ainsi que les risques d'incendie qu'il comporte, de nouveaux types de chimie sont apparus, avec des résultats encourageants : batteries sodium-ion, à flux redox, lithium-métal, etc. (cf. encadré).

Mais en matière de stockage, c'est aussi l'innovation du *vehicle-to-grid* (V2G) et du *vehicle-to-home* (V2H) qui ouvre de nouvelles perspectives positives dans la gestion de notre réseau électrique. Rendu possible par les nouvelles technologies de batteries et les *smart grids*, ces réseaux utilisant l'intelligence artificielle, le *vehicle-to-grid* permet d'ajuster notre consommation électrique en temps réel. « Il s'agit d'une forme de stockage délégué chez les consommateurs, dans les batteries de leurs véhicules, nous explique Cédric Philibert. Grâce au *smart charging*, les batteries peuvent prévoir les besoins en énergie du véhicule et de la maison, puis injecter le surplus d'électricité ici ou là, voire le renvoyer dans le réseau global, ce qui permet d'absorber de grandes quantités d'électricité quand il y a une forte production de solaire et d'éolien. » Attention, pour y parvenir, il faut posséder des batteries bidirectionnelles, capables de charger ou décharger. « Pour l'instant, poursuit Cédric Philibert, il n'y a pas assez d'incitation tarifaire pour les usagers, mais on dispose d'un bon outil avec le compteur Linky pour dimensionner ce pilotage des batteries embarquées à l'avenir. »

LE STOCKAGE À LONG TERME, LE DÉFI ESSENTIEL QUI ATTEND LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Pendant plusieurs décennies, le stockage à long terme de l'énergie a pu être assuré par un système mécanique datant des années 1930 : les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP). Le surplus d'électricité

37

L'ESPAGNE, PAR EXEMPLE, SOUHAITE ATTEINDRE 80 % D'ÉNERGIES RENOUVELABLES DANS SON MIX ÉNERGÉTIQUE EN 2030, CE QUI L'OBLIGE À DOUBLER SES CAPACITÉS DE STOCKAGE, NOTAMMENT DE LONGUE DURÉE.

terme, les STEP étant déjà largement optimisées dans beaucoup de pays. L'Espagne, par exemple, souhaite atteindre 80 % d'énergies renouvelables dans son mix énergétique en 2030, une ambition qui l'oblige à doubler ses capacités en matière de stockage, notamment de longue durée (LDES pour «long-duration energy storage»).

Pour parvenir à relever ce défi, le stockage thermique de l'électricité est une piste intéressante. Surtout utilisé dans l'industrie, mais aussi dans le marché résidentiel via les chauffe-eaux sanitaires qui offrent un formidable réservoir de stockage d'énergie aux heures creuses, ce type de stockage transforme l'électricité en chaleur. «Au niveau industriel, le principe est très simple, explique Cédric Philibert, ce sont des fils radiateurs qui chauffent des briques réfractaires, on fait circuler un courant d'air qui monte à 1000 °C.» Il existe une autre solution couramment employée, consistant à chauffer des sels fondus, lesquels vont alimenter un cycle eau-vapeur capable de produire de l'électricité. Le stockage thermique n'a toutefois pas fini de nous étonner. D'autres innovations voient ainsi le jour, à l'image de celle de la startup Polar Night Energy dans la ville finlandaise de Kankaanpää. Ici, la piscine est chauffée par un air circulant le long de silos remplis de sable chauffé à 500 °C par de l'énergie renouvelable excédentaire!

Autre piste pour le stockage à long terme: l'hydrogène, un gaz habituellement produit à partir d'énergie fossile mais qui peut aussi être obtenu grâce à l'électricité verte. Avec la baisse drastique du coût des énergies renouvelables, la France pourrait donc décarboner massivement sa production d'hydrogène dans l'industrie lourde en utilisant des surplus d'énergie solaire ou éolienne. Cet hydrogène peut également être utilisé pour les transports, alimenter le réseau de gaz ou encore produire de l'électricité grâce aux piles à combustible, même si le rendement n'est actuellement que de l'ordre

de 30%. À cet inconvénient majeur s'ajoute celui de son stockage et de son transport, qui nécessitent soit de le comprimer à forte pression, soit de le liquéfier: des procédés coûteux et risqués. Pour réduire les coûts, il est recommandé de privilégier la production d'hydrogène à côté du site de consommation, mais l'Union européenne étudie aussi la possibilité de transporter l'hydrogène sur de grandes distances à travers les canalisations de gaz naturel. En 2023, l'UE a ainsi annoncé la création prochaine d'un organe de supervision appelé Réseau européen des gestionnaires de réseau d'hydrogène (REGRH). Son objectif? Planifier le développement d'infrastructures, qu'il s'agisse de reconverter l'ancien réseau transportant du gaz fossile ou de créer de nouveaux gazoducs.

« LE STOCKAGE EST LA DERNIÈRE OPTION QUI RESTE QUAND LES AUTRES ONT ÉTÉ UTILISÉES. »

L'évolution exponentielle des technologies de stockage, notamment via les batteries, a donc permis aux énergies renouvelables de se développer. En miroir, leur nouvel essor réclame désormais d'innover et d'investir dans des dispositifs de stockage à grande échelle. Les défis sont nombreux, qu'ils soient techniques, financiers, politiques ou environnementaux, mais les projets de développement sont déjà sur de bons rails.

Surtout, il faut rappeler que notre transition écologique ne dépend pas seulement de notre capacité à stocker l'énergie. «De l'ensemble des options qui gèrent la variabilité des EnR, résume Cédric Philibert, le stockage est la dernière, c'est celle qui reste quand les autres ont été utilisées.» La sobriété et la flexibilité de notre réseau électrique représentent d'autres atouts pour compenser les potentielles pertes d'énergie. En pratiquant l'effacement de certaines activités industrielles ou même tertiaires pendant les heures de forte demande et en pilotant au mieux les multiples productions d'énergie sur le territoire, nous avons déjà le loisir de réduire les besoins de stockage. Alors, pourquoi s'en priver?

1 – La consommation finale brute est définie comme la somme de la consommation finale dans l'industrie, les transports (y compris transport aérien international), les services, le résidentiel et l'agriculture-pêche. À cela s'ajoutent la consommation d'électricité et de chaleur par la branche énergie pour la production d'électricité, de chaleur et de carburants destinés aux transports, et les pertes sur les réseaux pour la production et le transport d'électricité et de chaleur. Source : ministère de la Transition énergétique, «Chiffres clés des énergies renouvelables», édition 2023.

2 – CGDD/SDES 2024

L'ÉVOLUTION DES BATTERIES ÉLECTRIQUES

Vous souvenez-vous de votre tableau des éléments du cours de chimie? C'est ce qu'on va vérifier avec ce panorama des différents types de batteries électriques.

1 • LES BATTERIES LITHIUM-ION

Ce sont les plus répandues. Leur prix a chuté ces dernières années et leur rendement est très performant, proche de 100%. Avec leur bonne densité énergétique, elles sont plus petites et légères que d'autres batteries. Des avancées technologiques les ont aussi rendues plus éthiques, moins chères et plus sûres, grâce au passage d'une chimie NMC (nickel-manganèse-cobalt) à une chimie LFP (lithium-fer-phosphate). Les composants des batteries LFP sont plus faciles à trouver, et leur extraction est moins polluante, bien qu'ils les alourdissent.

2 • LES BATTERIES À FLUX REDOX

Connues depuis les années 1970, elles stockent l'énergie dans des réservoirs d'électrolyte liquide, dont la taille non négligeable est un atout pour le stockage stationnaire, notamment dans les centrales solaires. Leur longévité est supérieure à celle des batteries lithium-ion, certains fabricants affichant des durées de vie de vingt-cinq ans. Autre avantage: elles ne

sont pas inflammables, puisqu'elles fonctionnent avec des électrolytes à base d'eau.

3 • LES BATTERIES SODIUM-ION

Pour remplacer le lithium, certains parient sur le sodium. Très répandu dans le monde, il s'extrait facilement, pour un prix dérisoire, et avec un impact moindre sur l'environnement. Son inconvénient majeur? Une densité énergétique inférieure à celle du lithium, que les chercheurs espèrent corriger. Plus résistante aux fortes températures, la batterie sodium-ion a plus de garanties face au risque d'incendie. Reste malgré tout à créer une *supply chain* adaptée autour de cette nouvelle technologie. De quoi engendrer des investissements colossaux pour des industriels qui ne se lanceront pas tous sur le créneau, qui pourrait représenter seulement 10% du marché en 2030.

4 • LES BATTERIES SOLIDES LITHIUM-MÉTAL

Beaucoup d'espoirs se fondent sur cette nouvelle génération de batteries pour alimenter les véhicules électriques. Reposant sur un électrolyte solide grâce à des anodes en métal et non sur un électrolyte liquide traditionnel, ce système de stockage d'énergie marque une rupture dans plusieurs domaines: sécurité, poids, empreinte écologique, autonomie, vitesse de charge et même souveraineté énergétique! À l'image d'autres pays, la France a misé sur cette technologie via Blue Solutions, filiale du groupe Bolloré. L'entreprise s'enorgueillit d'avoir dix ans d'avance sur ses rivaux, et sa gigafactory prévoit d'ici 2032 une capacité de production annuelle de 25GWh, c'est-à-dire l'équivalent de 250000 véhicules/an. Ces batteries Blue Solutions promettent 40% d'autonomie en plus par rapport aux anciennes batteries et des temps de recharge ultrarapides, entre dix et quinze minutes.