

## Recherche et transition énergétique : quel chantier !

La transition énergétique dépend de plusieurs facteurs : économiques, géopolitiques, sociétaux, technologiques et scientifiques. Pour passer d'un monde énergétique basé à 80 % sur les énergies fossiles à un monde d'énergie durable avec une consommation gérée avec parcimonie, l'objectif est tant ambitieux qu'il suppose des ruptures.

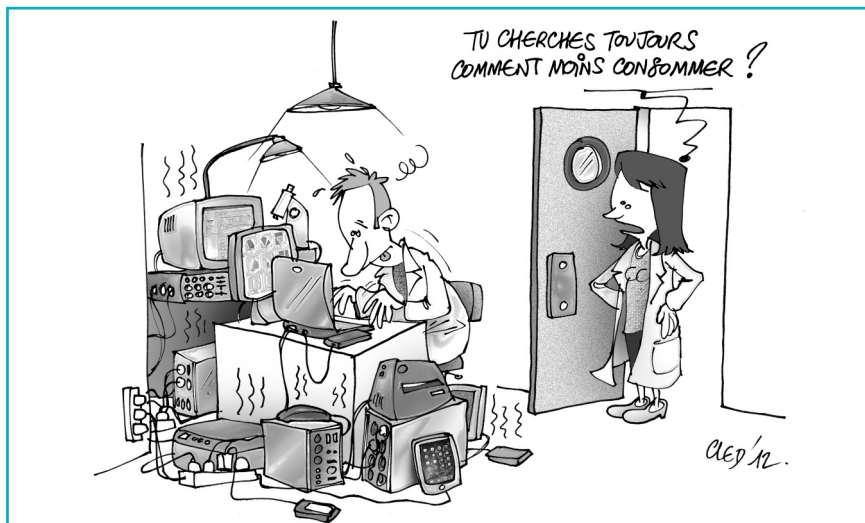
Une rupture ne repose pas sur une invention, elle implique une évolution industrielle, base d'une production de masse ; elle nécessite une nouvelle politique publique, une transformation des infrastructures pour assurer les nouveaux usages, et enfin une évolution sociétale pour encourager les nouveaux comportements.

C'est dire qu'il faut plus d'une vingtaine d'années pour la réaliser ; les exemples bien plus simples d'Internet ou des smartphones issus de la convergence de plusieurs innovations et technologies adoptées par un large public nous le démontrent. Voyons les domaines où la recherche et la technologie sont sollicitées par la transition énergétique\*.

### L'électricité

Pour le photovoltaïque et le silicium, on peut considérer que ce sont des technologies matures. Il faut maintenant plus s'inspirer de la photosynthèse et développer d'autres filières, dont les cellules à couches minces CGIS (cuivre indium gallium sélénium) avec un rendement qui atteint plus de 22 % mais attend un développement industriel. Les cellules CZTS (cuivre zinc étain soufre) et celles à pérovskites de type  $(\text{CH}_3\text{NH}_3)\text{PbI}_2$  présentent une vraie rupture à condition de résoudre leur faible tenue thermique. La voie des multijonctions et des cellules tandem pour améliorer les rendements n'est pas à proprement parlé une rupture mais un développement courageux qu'implique la feuille de route « 30-30-30 » — 2030, 30 % de rendement photovoltaïque, 30 c\$ par watt crête !

Pour l'éolien, c'est une recherche incrémentale qui vise à une meilleure fabrication des pales géantes supérieures à 60 mètres en composite, leurs revêtements furtifs pour moins gêner les télécommunications et antigivres pour éviter la projection de glaçons. La recherche sur les moteurs vise à améliorer les bobinages cuivre pour les générateurs asynchrones des éoliennes terrestres à boîte de vitesses et à diminuer le poids de terres rares pour les générateurs synchrones des éoliennes offshore sans boîte de vitesses et exigeant moins de maintenance.



### L'intermittence

Face à l'intermittence des productions renouvelables, il faut une stratégie à double face en recherche, soit comment organiser le réseau de distribution et comment stocker l'électricité ?

Les producteurs d'énergies renouvelables injectent de façon aléatoire les électrons dans le réseau en se moquant de son équilibre. Pour éviter que ce réseau ne s'effondre, il faut une exigence de maintien non à la demi-heure mais à la milliseconde. Avec la loi pour une République numérique d'octobre 2016, l'ouverture des données de consommation et de production aux niveaux local, régional, national va demander le développement de plateformes informatiques qui auront à gérer des millions de données en temps réel. C'est bien au-delà du « smart grid », le développement d'algorithmes de prévisions de consommation et de production pour ajuster constamment l'offre à la demande. Déjà sur le portail du réseau de transport d'électricité (RTE), il y a dix millions de données sur 43 jeux à gérer en temps réel ; si les illusionnistes de la transition écologique et solidaire du boulevard Saint-Germain continuent sur leur lancée, en 2025, c'est cent millions de données qu'il faudra gérer en temps réel pour éviter le chaos et la catastrophe prévisibles.

Autre face, la nécessité de maintenir l'inertie du réseau à côté des centrales nucléaires et thermiques : il faut créer une réserve par stockage de l'électricité. Ici encore, c'est une recherche incrémentale plutôt que de rupture. Il ne s'agit plus de réserves de quelques watts mais à l'échelle du mégawatt ou du gigawatt durant quelques heures, voire plusieurs jours. Même si Elon

Musk, le pdg de Tesla Motors, se dit capable d'assurer 100 MW durant quelques heures avec ses batteries Powerpack, pour le stockage sur site, les ions lithium devraient céder le pas aux batteries à flux, par exemple  $(\text{V}^5+\text{V}^4+\text{V}^3+\text{V}^2+)$  en réduisant leurs volumes et en améliorant leurs rendements. Sinon la recherche s'oriente vers un tout autre domaine : la découverte de sites pour de nouvelles centrales hydro-électriques STEP (stations de transfert d'énergie par pompage), de cavités profondes pour le stockage d'air comprimé (CAES, « compressed air energy storage », et AA-CAES, « advanced adiabatic-CAES »), et aussi de nouvelles céramiques peu coûteuses pour le stockage de la chaleur (600-800 °C).

Les centrales solaires thermiques sont également une solution de lissage de la production à l'aide du stockage de sels fondus ou de fluides à haute température, à condition que la réglementation Seveso évolue pour ces sites à forts tonnages de sels et produits chimiques.

### L'énergie nucléaire

La recherche s'est orientée vers plusieurs voies. Tout d'abord les RNR (réacteurs à neutrons rapides) qui permettent le recyclage des combustibles à base d'uranium et de plutonium. Le prototype ASTRID, réacteur de 600 MW refroidi au sodium, doit servir de démonstrateur pour le développement d'un parc de nouveaux réacteurs après 2030 permettant de recycler les stocks de combustibles U/Pu et de réduire drastiquement la consommation d'uranium.

La seconde voie est celle du réacteur à cycle de base thorium. Les recherches visent à comprendre et à évaluer le comportement de ce combustible sous

rayonnement neutronique, notamment celui des isotopes du protactinium mal connus, et à trouver le fluide échangeur d'alliages ou de sels fondus.

La troisième voie est une vraie rupture technologique : celle de la fusion nucléaire qui, maîtrisée, donnera une énergie quasi inépuisable sans émissions de gaz à effet de serre (GES) et avec moins de déchets radioactifs. Il n'y a pas d'année sans que l'annonce d'une nouvelle équipe ayant maîtrisé un plasma de quelques centaines de milliers de degrés durant quelques secondes ne relance le débat. Plus sérieusement, le projet mondial ITER, dont le chantier a débuté à Cadarache, devrait démontrer techniquement et scientifiquement que la fusion peut devenir une nouvelle source d'énergie à l'échelle industrielle à l'horizon 2030-2040.

Quelques ruptures technologiques et non les moindres se situent au niveau des alliages métalliques réfractaires internes, le système de chauffage du plasma, la maîtrise de sa stabilité dans la durée, et la récupération et le stockage des cendres radioactives tritiées.

### Le CO<sub>2</sub>, matière première

L'industrie consomme déjà du gaz carbonique lors de la synthèse de plusieurs produits — urée, méthanol, carbonates organiques et minéraux —, mais cela ne représentait que 150 Mt en 2016, soit 0,5 % en déduction de l'émission mondiale annuelle de 30 Gt. La recherche en ce domaine doit permettre de faire mieux en fabriquant des polymères, des mélamines par exemple, et en développant l'hydrogénation de CO<sub>2</sub> et l'activation électrocatalytique. Ce sont des secteurs très vastes dont les percées industrielles supposent une recherche intensive de nouveaux catalyseurs et photocatalyseurs sans métaux précieux. Aux États-Unis, en Allemagne et en Chine, des crédits importants sont consacrés à la captation, la séparation, l'absorption sélective, l'activation et aux nouvelles synthèses. En France, d'excellents laboratoires se sont lancés courageusement dans des voies innovantes, mais il semble que les crédits nationaux vont plutôt aux descriptions alarmantes et médiatiques du climat plutôt qu'aux moyens pour le signer.

### Les transports

Hormis le saut technologique « Hyperloop » du train subsonique dans un tube sous vide lancé par Elon Musk, il n'y a pas de vraies ruptures. Le transport par avion, qui est le plus générateur de GES, bénéficie de la spectaculaire démonstration de Bertrand Picard et André Borschberg de l'avion solaire Solar Impulse. Il est l'application en chimie d'innovations séquentielles — allègement de la structure, cellules photovoltaïques à couches minces, batteries ultra légères... — issues de recherches incrémentales sur des concepts déjà mûrs. Déjà des firmes internationales et des PME fabriquent des avions électriques, et la recherche comme à l'ONERA en France est très avancée sur le sujet. Ici, comme pour l'automobile, le salut viendra des électrochimistes. Car dans le secteur automobile, l'innovation viendra plus d'une nouvelle stratégie d'organisation et des métiers. Les motoristes des moteurs thermiques devront se convertir aux moteurs électriques bien plus simples et le cœur de l'automobile ne sera plus le moteur mais le pack de batteries avec tous ses accessoires de contrôle de charge/décharge et de température. Même si le prix des batteries décroît avec la production de masse, il représentera entre un tiers et la moitié du prix de l'automobile. La course à l'autonomie se nourrira des recherches d'amélioration du rapport puissance/poids, donc l'innovation viendra non seulement de l'électrochimie, mais aussi des nouveaux procédés de mise en forme et de montage des châssis et carrosseries en composites carbone légers, compatibles avec une production de masse. Se greffe une recherche de nouveaux algorithmes, d'interprétations d'images en temps réel et d'intelligence artificielle, le tout embarqué sur des véhicules autonomes, et tant pis si vous aimez jouer les Hamilton sur les petites routes !

### Les comportements

La transition énergétique, comme toute transition technologique, sera accompagnée d'une transformation industrielle, économique et sociétale. C'est dire que la recherche sera l'apanage

d'équipes pluridisciplinaires chassant en meutes. À quoi servirait une nouvelle méthode de synthèse de l'isopropanol à partir de la biomasse si elle implique une manipulation génétique de bactéries vite vilipendée et un procédé industriel non rentable ? L'acceptabilité d'une énergie renouvelable deux fois plus coûteuse pour l'utilisateur, celle d'un champ d'éoliennes modifiant un paysage, montrent qu'il faudra une recherche proche du marketing pour persuader l'opinion et tenir compte des changements de paradigmes sociétaux non exempts de contradictions. Les écologistes anti-nucléaire, pourtant favorables aux énergies décarbonées, en sont un exemple. Il ne pourra y avoir transition énergétique sans recherches poussées en économie et en sciences humaines et sociales qui, dès le début, doivent être associées à la recherche scientifique et technologique.

Le recyclage est aussi un bon exemple : il commence par l'attitude individuelle favorable ou non au tri des plastiques, des métaux... et l'implication ou non des fabricants et des industriels des procédés. La pénurie des ressources minérales et des métaux stratégiques demande un effort considérable de publicité, de réglementation et de recherche en procédés métallurgiques. Nos objets électroniques « obsolètes » constituant les « mines urbaines » demandent le même niveau d'études économiques et d'innovations techniques qu'exigent la réouverture des mines et l'exploitation des gisements à faible concentration. L'évolution des usages, de notre consommation, une population majoritairement de plus en plus connectée, les développements de l'intelligence artificielle, la recherche et l'innovation... induiront certainement des ruptures scientifiques et sociétales qui sont, comme les éruptions volcaniques ou les ouragans des Antilles, certaines mais imprévisibles.



Jean-Claude Bernier  
Septembre 2017

\*Voir le numéro spécial « Chimie et transition énergétique », *L'Act. Chim.*, 2016, 408-409.

Retrouvez-nous en ligne !  
**lactualitechimique.org**  
 Archives, actus, photothèque...