

## Transitions technologiques et Green Deal

Samuel Furfari\*, Ernest Mund\*\*

@ 86676

**Mots-clés : Europe verte, transition énergétique, renouvelables, nucléaire, hydrogène**

***Les technologies évoluent sous l'effet de nombreux facteurs dont les progrès de la science. Pilotée par les forces du marché, l'évolution est lente. En matière d'énergie, l'unité de mesure est grosso modo le siècle. Les préoccupations relatives à l'évolution du climat introduisent un élément nouveau : la volonté politique. L'UE s'est engagée fin 2019 à atteindre la neutralité carbone en 2050, grâce essentiellement aux énergies renouvelables. L'examen des données du passé et des données prospectives permet de saisir la difficulté du problème. Après un rappel de la théorie du processus classique de transition, l'article passe en revue les exigences requises pour que le Green Deal européen soit un succès.***

Les transitions technologiques ont fait l'objet de nombreux travaux durant le dernier demi-siècle, en particulier dans le domaine énergétique et les transports. Des ingénieurs, analystes de systèmes, mathématiciens et économistes se sont attelés à déterminer leurs propriétés et, en particulier, leurs temps de développement. D'importants résultats sont quelque peu tombés dans l'oubli [1, 2, 3]. La chose est regrettable, car pour la première fois, une transition technologique est volontairement mise en route par des gouvernements occidentaux soucieux d'imposer un plafond aux rejets de CO<sub>2</sub>. Il est capital que l'objectif final et le rythme pour y arriver soient réalistes.

L'Union européenne (UE) est engagée depuis décembre 2019 dans une transition dénommée Pacte vert ou *Green Deal* (GD) [4], appelée à

englober tous les aspects de l'économie de ses États membres et de la vie privée de ses citoyens. Elle envisage une neutralité carbone à l'horizon 2050 qui se décline, en pratique, par 100 % d'énergies renouvelables sauf à considérer que l'utilisation du gaz naturel (encore tolérée) soit accompagnée de l'impayable capture et stockage du CO<sub>2</sub> que sa combustion émet. Ceci n'est rien moins qu'un abandon pur et simple du système énergétique actuel avec comme conséquence un changement drastique du système de transport, aussi bien marchand que privé, dépendant aujourd'hui à hauteur de 94 % des produits pétroliers. Est-ce réaliste?

L'ampleur du changement est telle que les conséquences économiques et sociales seront incommensurables. Est-il possible de le réaliser dans le temps prévu? Nous allons tenter de formuler une réponse en rappelant ce que l'on sait à propos des mutations technologiques portées naturellement par les progrès scientifiques et techniques couplés au développement économique et aux besoins de la société.

\* Université Libre de Bruxelles.

\*\* Université catholique de Louvain (cf. biographies p. 87-88).  
Nous tenons à remercier Paul Alba et Olivier Rech de nous avoir fourni un ensemble de données numériques qui nous ont permis de compléter l'illustration de ce travail.

Le texte qui suit n'a pas pour but d'apporter des éléments méthodologiques nouveaux, mais de faire une courte synthèse des connaissances et une mise en perspective de celles-ci par rapport au volontarisme officiel.

## 1. Transition ou tournant énergétique?

Les expressions «transition énergétique» et «tournant énergétique» sont souvent utilisées, mais elles ne désignent pas exactement la même chose. Il est donc utile de les préciser et de rappeler leurs origines.

Les travaux relatifs aux transitions dont nous parlons plus bas portent sur la substitution progressive d'une technologie, plus avancée ou offrant des avantages nouveaux, à une autre qui tend à disparaître. Il est entendu que le processus lié aux forces du marché prend du temps pour aboutir.

Au début des années 1980 apparaît le concept de tournant (*wende*, en allemand). Dans un livre intitulé *Energie-Wende, Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran*, des chercheurs de l'Öko-Institut, organisme environnemental allemand, proposent en 1980 l'abandon du pétrole et de l'uranium [5]. Le terme simplifié *Energiewende* est rapidement adopté de manière officielle pour désigner la lutte contre le changement climatique et l'abandon du nucléaire. L'Allemagne s'engage fermement dans cette voie dès le début du siècle, visant un changement radical de politique énergétique.

L'expression «transition énergétique» est moins puissante que sa correspondante allemande, car elle implique un passage progressif vers quelque chose de nouveau. Des écologistes tels Noël Mamère [6] aiment d'ailleurs le mot transition qui offre un sentiment de douceur. D'autres organisations, telle Désobéissance Écolo Paris (DEP), refusent le terme de transition, estimant que l'urgence exige une position radicale [7].

En 2010, Vaclav Smil démontre dans *Energy Transitions* qu'une telle opération ne peut

se faire facilement, ni dans les délais fixés à l'époque par l'administration Obama [8].

Du côté de l'UE, l'expression «transition énergétique» apparaît dans un document de 1982 [9] : «La transition énergétique une fois amorcée, en ouvrant des perspectives d'application de technologies nouvelles, sera de nature à favoriser le développement d'une industrie moderne et dynamique en Europe, capable d'occuper sa place dans la compétition mondiale». À l'époque, ce n'était pas pour répondre à des préoccupations environnementales, mais pour faire face à des chocs pétroliers. Cette transition englobait le nucléaire et le charbon, le gaz naturel étant considéré alors comme une ressource peu abondante, exclue de l'utilisation en centrales électriques [10].

## 2. Premiers travaux et contribution de l'IIASA

À la fin des années 1960, deux chercheurs de General Electric, Fisher et Pry, développent un modèle mathématique élémentaire décrivant la substitution d'une technologie par une autre dans un marché ouvert [11].

Ce modèle repose sur trois idées simples : (1) l'avancée technologique est un processus compétitif qui participe pleinement aux règles du marché ; (2) si le processus de substitution a évolué de quelques pourcents, il va se poursuivre jusqu'au bout ; (3) en désignant par  $f$  la part de marché du nouveau processus à l'instant  $t$ , le taux de croissance relatif de cette part est proportionnel au pourcentage restant du processus ancien ( $1-f$ ). En termes mathématiques, la proposition (3) se traduit par l'expression :

$$\frac{1}{f} \frac{df}{dt} = 2\alpha(1-f) \quad (1),$$

dans laquelle  $\alpha$  est liée à la constante de proportionnalité. De cette relation différentielle, on déduit la loi d'évolution dans le temps de la part de marché de la nouvelle technologie :

$$f(t) = \frac{1}{2} [1 + \tanh \alpha(t-t_0)] \quad (2).$$

## Transitions technologiques et Green Deal

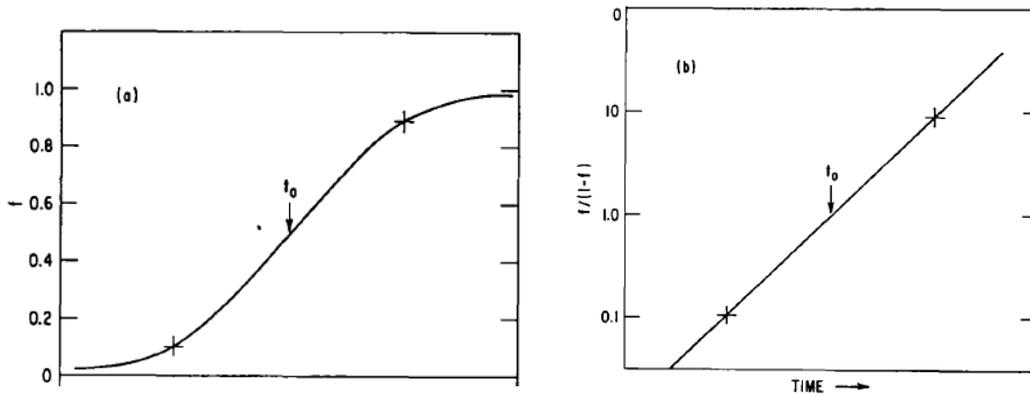


Figure 1. Évolution temporelle de  $f(t)$  et de  $f(t)/(1-f(t))$  [1]

Au départ, le processus de substitution est de nature exponentielle. Toutefois, un effet de saturation s'installe au cours du temps, la fraction de technologie à remplacer allant en diminuant. C'est ce qui explique la présence de la tangente hyperbolique dans la relation (2). Cette dernière est connue dans la littérature sous le nom de loi logistique de Verhulst, ou de « courbe en S », à cause de son allure caractéristique représentée à la Figure 1a, empruntée à la référence 1. On vérifie facilement qu'en représentation logarithmique la quantité  $f/(1-f)$  est représentée par une droite, comme le montre la Figure 1b.

Incidentement, on remarque dans la relation (2) la présence d'un paramètre  $t_0$  dont il est aisé de voir qu'il n'est autre que l'instant auquel la part de marché de la nouvelle technologie atteint 50 %.

Dans leur article de base, Fisher et Pry [11] traitent une série de substitutions qui vont de produits de la vie courante (fibres naturelles par des fibres synthétiques, cuirs par des matières plastiques, savon par des détergents, etc.) à des procédés industriels majeurs (remplacement des aciers Bessemer). Tous les cas traités s'inscrivent remarquablement dans le cadre de la relation logistique (2), comme le montre par exemple la Figure 2 pour un ensemble de transitions relatives à des procédés industriels.

On remarquera par exemple sur cette figure qu'il a fallu environ 40 ans (de 1860 à 1900) au

substitut du procédé Bessemer pour passer de 1 à 50 % de part de marché dans la production d'acier.

C'est l'équipe de Marchetti, Nakicenovic et Peterka à l'IIASA (*International Institute for Applied Systems Analysis*), centre de recherche situé aux alentours de Vienne (Autriche), qui prend la relève pour appliquer la méthodologie aux transitions de technologies énergétiques. Comme celles-ci impliquent des ressources de natures différentes (bois, charbon, pétrole, gaz

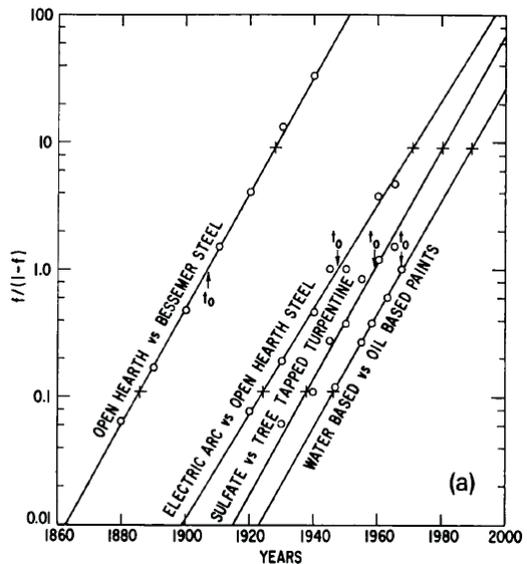


Figure 2. Évolution de  $f(t)/(1-f(t))$  pour différents processus industriels [1]

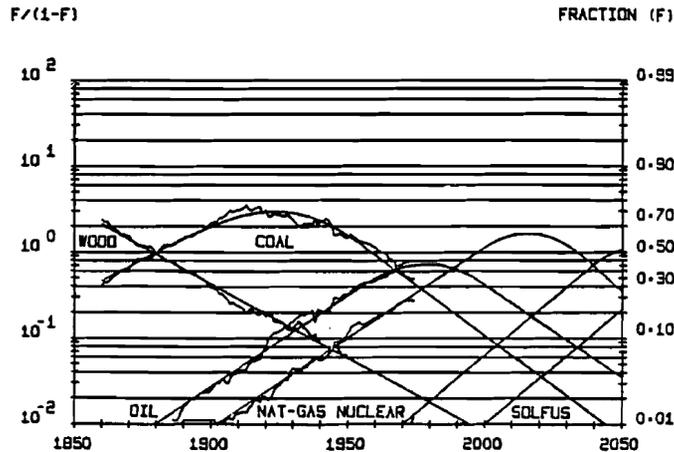


Figure 3. Évolution de  $f(t)/(1-f(t))$  pour différents systèmes énergétiques [1]

naturel...), la formulation du problème est plus compliquée, les processus de substitution étant couplés. Trois rapports de l'équipe de recherche publiés à la fin des années 1970 décrivent la généralisation de la méthode et fournissent un échantillon très varié de résultats appliqués aussi bien à l'échelle mondiale qu'au niveau de grandes nations ou au niveau de sous-systèmes énergétiques comme la production électrique [1, 12, 13]. La Figure 3 en donne une illustration pour l'utilisation des combustibles classiques ainsi que le nucléaire, à l'échelle mondiale.

Les effets de couplage entre les systèmes en concurrence sont notoires : la phase de croissance de la loi logistique pour le système  $k$  se substituant au système  $(k-1)$  est interrompue par l'arrivée du système  $(k+1)$ , se substituant à lui et réduisant progressivement sa part de marché.

La Figure 3 montre que le processus de transition prend environ un siècle pour permettre à une nouvelle technologie de conquérir 50 % de part de marché. C'est, en particulier, le cas du pétrole brut entre 1880 et 1980 et un peu plus tard du gaz naturel. On remarquera que les données numériques sont arrêtées à 1970 (année de la publication) alors que leurs ajustements logistiques sont étendus jusqu'à 2050. À l'époque, il n'est pas encore question d'intervention de

nature politique dans le processus de transition. Cette intervention débute aux alentours des années 1980. En complétant les courbes d'évolution de la Figure 3 à l'aide des données les plus récentes de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), on obtient la Figure 4.

L'écart progressif de la part de marché  $f(t)$  par rapport au comportement de type logistique induit par la politique volontariste est manifeste. Une question fondamentale surgit : la vitesse de transition peut-elle être arbitrairement élevée?

Il est essentiel de distinguer part de marché et quantités consommées. La part de marché d'une énergie primaire peut fort bien diminuer au cours du temps malgré des consommations croissantes; en particulier si cette croissance est moins forte que celle des énergies concurrentes. Aucune des énergies utilisées au cours de l'histoire n'a jusqu'à présent été totalement abandonnée, même durant des phases de déclin de leur part de marché. Bois, charbon, pétrole et gaz naturel, qui se sont succédé à intervalles de décennies, font encore l'objet de demandes en augmentation comme le montrent les Figures 5 et 6 donnant respectivement l'évolution de la consommation d'énergie primaire en exajoules ( $10^{18}$  J) entre 1965 et 2018 et les taux de croissance de celles-ci pour la période 2009-2019. Ce ne sont que leurs proportions dans le marché

## Transitions technologiques et Green Deal

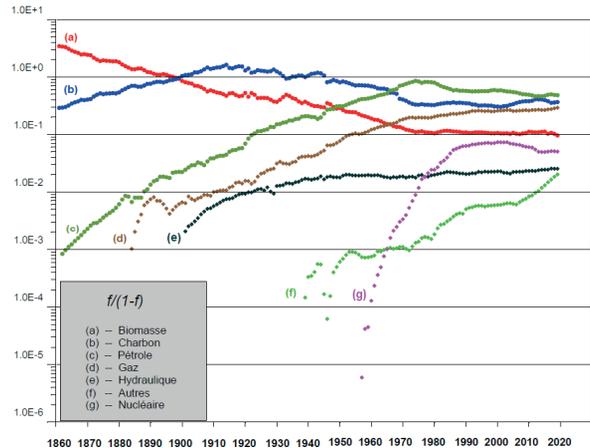


Figure 4. Évolution de  $f(t)/(1-f(t))$  pour différents systèmes énergétiques (données AIE)

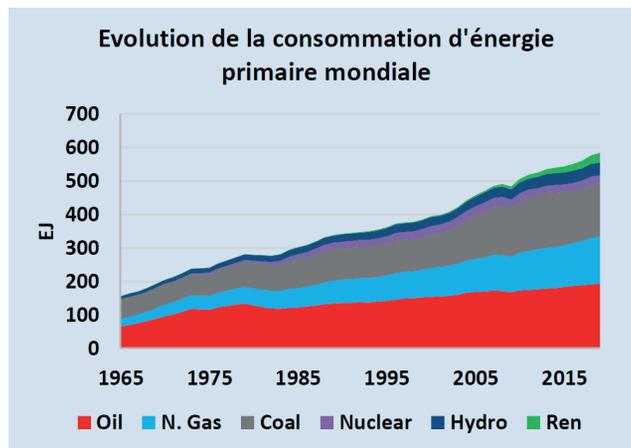


Figure 5. Évolution de la consommation d'énergie primaire depuis 1965 (données de BP en EJ)

mondial qui sont en diminution, mouvement qui va inmanquablement se poursuivre pour les raisons invoquées plus haut.

La seule modification majeure vécue dans les dernières décennies est l'abandon des produits pétroliers pour la génération d'électricité, due à l'explosion des prix lors des chocs pétroliers des années 1970 et à l'arrivée concomitante de la filière nucléaire. Ceci n'a toutefois nullement ralenti la consommation totale de pétrole brut

(toutes applications confondues), la demande en carburant n'ayant cessé de croître.

Une première conclusion des résultats qui précèdent est que dans un passé relativement étendu où les transitions énergétiques étaient régies par la concurrence et les lois du marché, les temps au bout desquels elles aboutissaient furent assez longs. Pour comprendre ce que les considérations exogènes actuelles (limitation des rejets de gaz à effet de serre) vont impliquer dans les années à venir, il est utile

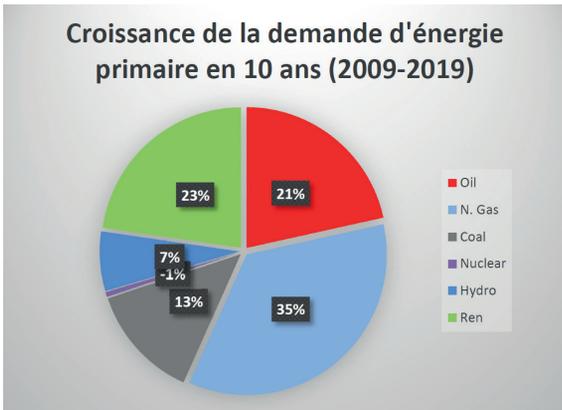


Figure 6. Répartition de la croissance de la demande d'énergie primaire sur 10 ans (données de BP, 2009 et 2019)

de représenter l'évolution des parts de marché des énergies primaires en fonction des consommations annuelles (en Mtep/an). Celles-ci sont fournies à la Figure 7 pour les ensembles d'énergies fossiles et non fossiles à l'échelle mondiale. Les données prospectives pour 2020-2050 sont empruntées à BP.

Ces données prospectives impliquent deux scénarios dont l'un est contraignant («*Rapid Scenario*»). Il revient à peu de chose près à faire

(à l'envers, cette fois) la transition énergétique de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, les énergies non fossiles, aujourd'hui aux alentours de 20 %, passant à environ 60 % en 2050. La différence fondamentale entre les deux situations réside dans les quantités d'énergie mises en jeu, le facteur multiplicatif pour les 30 années à venir étant situé aux alentours de 15. Une chose est sûre : pour avoir des chances minimales de réussite, l'UE doit se doter de moyens robustes au plan technologique, disponibles (ou en voie de disponibilité) en matière industrielle et garantis en matière de ressources minérales. Or, les nations qui la composent sont loin de l'unanimité sur la conduite.

### 3. La nécessité du nucléaire

Pour s'approcher au plus près de la neutralité carbone en 2050, ces nations devraient toutes miser sur l'ensemble des technologies exemptes de CO<sub>2</sub>, ce qui inclut *ipso facto* le nucléaire. Plusieurs raisons poussent à l'adoption de cette stratégie. Outre l'avantage de ne pas impliquer le CO<sub>2</sub>, le nucléaire possède l'atout — qu'il partage avec l'hydroélectricité — de produire de l'électricité en continu dans des installations de grande puissance. Toutefois, en ce qui concerne l'hydroélectricité, la plupart des sites sont déjà aménagés dans l'UE occidentale (bien qu'il

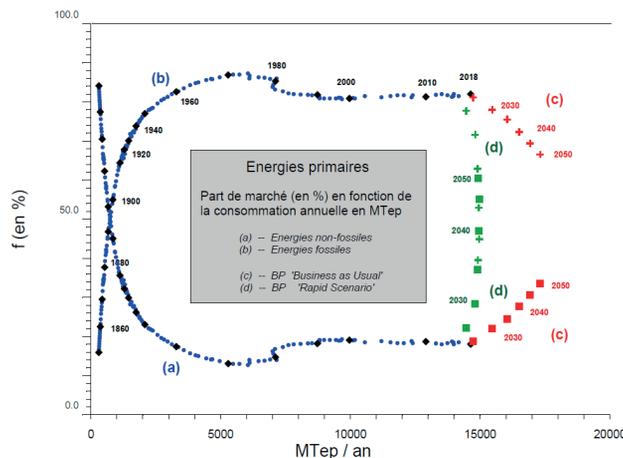


Figure 7. Évolution de la part de marché  $f$  d'énergies primaires en fonction des consommations annuelles en Mtep/an (données AIE et BP pour le monde)

## Transitions technologiques et Green Deal

reste des sites potentiels dans les pays d'Europe orientale et particulièrement les Balkans) et il existe une vigoureuse hostilité à l'aménagement de sites restants. C'est donc au nucléaire que devraient revenir les investissements en capacités nouvelles de puissance centralisée.

La tendance actuelle pousse aux énergies renouvelables intermittentes (EnRi éolien et solaire) à facteurs de charge limités. L'exclusion du nucléaire d'un bouquet énergétique neutre en carbone *stricto sensu* revient donc à bannir tous les moyens centralisés de production. Or la production décentralisée est aléatoire. Ceci pose de sérieux problèmes au niveau de la stabilité du réseau et de la sécurité d'approvisionnement. Les enjeux d'un développement massif des EnRi dans le système électrique européen sont aujourd'hui bien connus [14]. Leurs partisans d'ailleurs ne les nient pas, mais plutôt que d'adopter le nucléaire pour les circonvenir,

ils admettent le gaz naturel en tant qu'énergie « pont », ce qui révèle clairement les motivations profondes de la démarche (suppression prioritaire du nucléaire) et repousse la neutralité carbone recherchée à un futur plus lointain.

Dans l'éventail des arguments opposés au nucléaire, il y a le coût économique. Il est vrai qu'en matière de coût, les centrales en construction aujourd'hui (Flamanville, Olkiluoto, mais aussi Hinkley Point C et Vogtle) ont largement dépassé les estimations initiales, parfois de facteurs proches de 6. Mais la comparaison des coûts du nucléaire et des EnRi, sur base des seules installations de production, n'est pas pertinente. Pour les EnRi, il y a lieu d'ajouter tous les coûts annexes liés aux infrastructures de transport et de distribution, aux pertes qu'elles entraînent, à la sûreté d'approvisionnement (impliquant des moyens physiques de stockage tels que les STEP — stations de transfert d'énergie

	Nucléaire	Éolien onshore	Éolien offshore	PV	PV et batteries
--	-----------	----------------	-----------------	----	-----------------

France – Favorable au nucléaire

c€/kWh investissement (hors actual)	1,40	8,58	9,60	16,43	37,87
Facteur multiplicatif p/r au nucléaire	1,00	6,20	6,90	11,80	27,10

France – Défavorable au nucléaire

c€/kWh investissement (hors actual)	2,47	4,84	6,91	12,08	22,45
Facteur multiplicatif p/r au nucléaire	1,00	2,0	2,80	4,90	9,10

Belgique – Favorable au nucléaire

c€/kWh investissement (hors actual)	0,98	4,45	6,64	11,72	34,43
Facteur multiplicatif p/r au nucléaire	1,00	4,50	6,80	11,90	35,10

Belgique – Défavorable au nucléaire

c€/kWh investissement (hors actual)	1,98	4,08	6,15	11,31	22,45
Facteur multiplicatif p/r au nucléaire	1,00	2,10	3,10	5,70	11,30

**Tableau 1. Comparaison des coûts de quatre scénarios 100 % d'énergie électrique décarbonée, sur base de deux jeux d'hypothèses [16]**

par pompage — ou les batteries) et à la gestion du réseau électrique [15]. Les *subsides* accordés à la rémunération du marché de capacité ne peuvent être négligés. L'ambiguïté de l'affirmation tient au fait que ces coûts échappent aux producteurs, mais se retrouvent sur la facture du consommateur. Jean-Marc Jancovici a estimé avec énormément de détails le montant de ces coûts pour la situation française (sur base des données de consommation actuelle) pour quatre scénarios hypothétiques : nucléaire, éolien onshore, éolien offshore et photovoltaïque à 100 % dans chacun des cas [16]. Nous avons effectué les mêmes estimations pour la situation belge en adoptant là où la chose était possible les mêmes hypothèses de coûts unitaires. Le Tableau 1 fournit l'ensemble des résultats.

Les calculs ont été effectués sur base de deux ensembles de coûts unitaires : un premier plus favorable au nucléaire et un second, plus favorable aux EnRi [15]. Les résultats apparaissent sous forme de coûts globaux de la production d'électricité (centimes €/kWh) et de valeur relative par rapport au nucléaire pour les mêmes productions totales d'électricité dans chacun des scénarios et pour les deux pays respectifs. La conclusion est sans appel. On notera par ailleurs que des organismes internationaux comme l'AIE et l'OCDE arrivent à des conclusions très semblables sur base de données beaucoup plus étendues dans le monde [14, 17].

#### **4. L'éternelle transition de l'hydrogène**

Une transition énergétique annoncée depuis longtemps est celle qui inclut le vecteur énergétique hydrogène. L'Allemagne et la Commission européenne [18] viennent, à la suite l'une de l'autre, de présenter une stratégie sur ce sujet. La France leur a très récemment emboîté le pas. L'ambition de l'UE est de faire de l'hydrogène propre (car n'impliquant pas de CO<sub>2</sub>) une solution de choix pour réaliser une économie climatiquement neutre en matière de mobilité, l'hydrogène (associé à des piles à combustible) s'inscrivant en parallèle au développement du véhicule électrique doté de batteries lithium-ion, dans les cinq années à venir.

Cet intérêt de l'UE pour l'hydrogène est loin d'être neuf. Il remonte à 1972, avant la première crise pétrolière, date à laquelle l'enthousiasme pour l'énergie nucléaire permettait de préparer la dissociation atomique de l'eau grâce aux très hautes températures. Par la suite, l'UE s'est préoccupée de la fin annoncée du pétrole et il fut question alors de revenir au processus de Fischer-Tropsch pour la liquéfaction du charbon. Ce procédé mis au point par les nazis durant la Seconde Guerre mondiale pour assurer leurs besoins en carburant s'appuie sur l'hydrogène dont on sait très bien comment le produire à partir d'énergies fossiles. Le processus, par vapocraquage de gaz naturel, est un procédé éprouvé, utilisé un peu partout dans le monde, l'hydrogène étant un produit de base de la chimie et de la pétrochimie ; 85 % de l'hydrogène est produit dans le monde à partir de gaz naturel.

La nouvelle stratégie de l'UE — électrolyse de l'eau sur base de la production renouvelable éolienne et solaire, de préférence au vapocraquage — est difficile à envisager tant le gaz naturel, matière de base du processus actuel, est abondant, disponible, sans contraintes géopolitiques et bon marché. En opposition, la filière de la transition hydrogène est inefficace. Le processus consiste en la succession des étapes suivantes : 1) produire de l'électricité excédentaire à l'aide de l'énergie éolienne et solaire, 2) transformer cette électricité en hydrogène par électrolyse de l'eau, 3) comprimer ou liquéfier et transporter l'hydrogène, 4) le brûler pour produire de l'électricité. Aucune de ces étapes ne nécessite une nouvelle technologie, mais les procédés chimiques industriels ne sont jamais efficaces à 100 %. L'étape 2 est — au mieux — efficace à 80 % et l'étape 3 à 70 %. L'étape 4 avec les piles à combustible — une technologie coûteuse qui n'est pas encore parvenue à s'imposer comme solution de transition malgré 30 ans de soutien public — est efficace à 50 %. L'efficacité de l'ensemble du processus est donc de  $0,80 \times 0,70 \times 0,50 = 0,28$ . De plus, l'intermittence des énergies renouvelables se répercute sur l'intermittence de la production d'hydrogène. Nos calculs indiquent que pour pallier cette condition rédhibitoire, il faudrait installer

trois fois plus de capacités intermittentes qu'il n'en faudrait pour uniquement produire de l'électricité au moment du besoin [19].

D'évidence, les forces du marché mondial d'hydrogène préféreront croire en la stratégie du vapocraquage plutôt qu'en celle qui a les faveurs de l'Europe, peu intéressante au plan économique du fait des coûts systèmes très élevés associés aux énergies renouvelables intermittentes (comme expliqué dans la section 3) et à la perte de près de 70 % de l'énergie initiale.

En ce qui concerne la mobilité, il n'en va pas seulement de raisons économiques, mais aussi — et surtout — des conditions d'utilisation du vecteur énergétique et de sa distribution. Du point de vue de l'utilisation, des difficultés intrinsèques existent qui sont liées à la nature de l'élément et à ses propriétés physico-chimiques. La compression du gaz (indispensable pour obtenir une certaine densité énergétique) requiert beaucoup d'énergie, le passage de 1 bar à des pressions comprises entre 300 et 800 bars représentant 10 à 15 % du potentiel énergétique de l'hydrogène. De plus, la fugacité de l'hydrogène requiert, afin d'éviter des explosions, des précautions parfaitement maîtrisées (depuis longtemps) au plan industriel, mais qui seront plus difficiles à assurer par les citoyens. Du point de vue de la distribution, on peut envisager de le transporter par pipeline. Tant en Europe qu'aux États-Unis, des réseaux de pipelines existent qui sont en exploitation depuis des années. Toutefois, le problème de la compression entre le point d'alimentation du réseau et le réservoir du client demeure.

Résumons la pensée d'un fonctionnaire européen en 1979 [20] : suite à l'évolution vers de nouveaux systèmes énergétiques utilisant des sources primaires de substitution, le besoin de combustibles synthétiques augmentera. Dans ce cadre, l'hydrogène pourrait jouer un rôle important en tant que tel ou pour la production de composés hydrogénés.

- L'utilisation de l'hydrogène a l'avantage d'éliminer l'émission de CO<sub>2</sub> accompagnant la combustion des autres combustibles liquides ou gazeux.

- Son utilisation dans les moteurs avait été envisagée il y a longtemps déjà, à l'époque des premières idées et réalisations de divers types de moteurs à combustion.

- À défaut d'un réseau de distribution, le problème qui se pose est celui du stockage : la densité énergétique par unité de volume peut limiter l'autonomie des voitures. Les premières réalisations — d'ailleurs déjà en cours — pourraient concerner des véhicules de transport urbain, du service postal, des parcs industriels, à court rayon d'utilisation dans la journée, et centralisés la nuit, pour la recharge et l'entretien.

- Pour les transports maritimes, les possibilités existent, mais à plus long terme. Une application intéressante consisterait à utiliser des navires pour transporter, sous forme d'hydrogène (ou de composés d'hydrogène), de grandes quantités d'énergie sur de longues distances.

- Pour les transports aériens, les perspectives sont très encourageantes et la densité énergétique par unité de poids — le paramètre intéressant dans ce cas — est beaucoup plus élevée pour l'hydrogène que pour les autres solutions possibles. Des réalisations expérimentales peuvent être envisagées dans les années 1990.

- Le problème de la sécurité dans le cas d'une utilisation de l'hydrogène dans le système énergétique se pose sous un double aspect : celui de l'acceptabilité de la part de l'opinion publique, et celui de la détermination des conditions spécifiques d'emploi par des utilisateurs «non industriels». D'autre part, l'expérience déjà acquise, dans de nombreuses utilisations qui datent de plusieurs années, met en évidence une source de données positives : il n'y a pas de difficultés spécifiques insurmontables pour une application directe et sûre de l'hydrogène, pour lequel il faut évidemment appliquer des normes de sécurité propres à l'usage de tout combustible.

- Les évaluations des coûts de production des combustibles synthétiques et de l'hydrogène nous montrent que les alternatives aux systèmes actuels basés sur les hydrocarbures sont chères, et nous indiquent combien il faudra payer pour ces alternatives. Toutefois, deux constatations générales peuvent être faites : les alternatives existent et, vu les tendances

du marché pétrolier, leur compétitivité se rapproche dans le temps.

C'était en 1979. Un peu plus de 40 ans plus tard, rien n'a changé et la transition annoncée n'a pas eu lieu. En sera-t-il différemment sous l'effet du volontarisme? Cela paraît peu probable.

## Conclusion

Avec un volontarisme parsemé de préjugés, les efforts seront ruineux sur le plan économique et aboutiront à une forme d'échec. Dans une UE vivant en autarcie, cela serait certainement pénible pour ses membres. Mais, dans un monde globalisé où des éléments concurrents se tournent instinctivement vers les sources de progrès, des États membres seront peut-être induits à relâcher leurs liens avec le navire Europe, ce qui serait très néfaste pour l'ensemble.

L'UE — née au départ de la volonté de mettre à disposition des économies de ses États membres une énergie «abondante et bon marché» [21] — joue donc en quelque sorte son avenir sur le slogan de la transition énergétique. Comme cette dernière pourra difficilement avoir lieu dans les temps annoncés pour les raisons exposées plus haut, elle doit se ressaisir sous peine de connaître l'échec et de souffrir à long terme du retard qu'elle aura accumulé dans le domaine de l'innovation (en particulier, nucléaire) par rapport aux entités États-Unis, Russie, Chine et Inde. Une transition de cette ampleur présuppose l'intelligence des enjeux, l'absence de préjugés et la cohérence de la démarche : elle exige du temps.

## RÉFÉRENCES

- [1] C. Marchetti, N. Nakicenovic, "The Dynamics of Energy Systems and the Logistic Substitution Model", IIASA, RR-79-13, Laxenburg (Autriche), 1979.
- [2] R. Lyman, "Transition to Reality – The prospects for rapid global decarbonization", Global Warming Policy Foundation (GWPF), Essay 8, 24 pp., 2019.
- [3] R. Gross et al., "How long does innovation and commercialisation in the energy sectors take?", *Energy Policy* 123, 682-699, 2018.
- [4] Commission européenne, Communication «Le pacte vert pour l'Europe», COM/2019/640 final, 11 décembre 2019.
- [5] F. Krause, H. Bossel et K-F. Müller-Reissmann, *Energie-Wende. Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl Und Uran*, S. Fischer, 233 pp., 1980.
- [6] Noël Mamère, «L'écologie est le meilleur outil de lutte contre les inégalités», *Usbek & Rica*, 5 juillet 2020.
- [7] DEP, «Écologie sans transition», *Divergences*, 193 pp., 2020.
- [8] V. Smil, "Energy Transitions – History, Requirements, Prospects", ABC-Clio, 170 pp., 2010.
- [9] Commission européenne, COM (82) 124 final du 18 mars 1982, Communication de la Commission au Conseil concernant le réexamen du programme de recherche et de développement dans le domaine de l'énergie arrêté par la décision du conseil du 11 septembre 1979.
- [10] UE, Directive 75/404 du 13 février 1975.
- [11] J.C. Fisher, R.H. Pry, "A Simple Substitution Model of Technological Change", *Technological Forecasting and Social Change*, 3, 75-88, 1971.
- [12] V. Peterka, "Macrodynamics of Technological Change: Market Penetration by New Technologies", IIASA, RR-77-22, Laxenburg (Autriche), 1977.
- [13] N. Nakicenovic, "Software Package for the Logistic Substitution Model", IIASA, RR-79-12, Laxenburg (Autriche), 1979.
- [14] V. Silva et al., «Analyse technico-économique d'un système électrique européen avec 60 % d'énergie renouvelable», *REE* 5, 40-53, 2016.
- [15] NEA-OECD, "The Costs of Decarbonisation – System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables", NEA-7299, 224 pp., 2019.
- [16] J.M. Jancovici, «100 % renouvelable pour pas plus cher, fastoche?», accessible sur le site <https://jancovici.com/transition-energetique/renouvelables/>.
- [17] IEA-AIE, "Nuclear Power in a Clean Energy System", 100 pp., 2019.
- [18] Commission européenne, Communication, "Powering a climate-neutral economy: An EU Strategy for Energy System Integration", COM (2020) 299 final, 8 juillet 2020.
- [19] Samuel Furfari, *L'utopie hydrogène*, Kindle Publishing, 2020.
- [20] G. Beghi, *Journal des Ingénieurs*, 2, 1-3, 1979.
- [21] Résolution de Messine, 1-3 juin 1955.