

Jacques PERCEBOIS



L'ÉNERGIE

*racontée à travers
quelques destins tragiques*



Editions
CAMPUS
OUVERT

« *Éditions Campus ouvert* »

Direction éditoriale : Vincent PLAUCHU, maître de conférences honoraire en économie (Université Grenoble-Alpes).

Coordination : Pierre CROCE, ancien responsable de la Cellule d'aide à la publication de (Université Grenoble-Alpes).

Cette maison d'édition créée par l'Association pour la diffusion d'études et recherches (ADER) a pour principal objectif de rendre accessibles, à des prix raisonnables, des cours dispensés dans le champ des sciences sociales, et de diffuser des documents, études et recherches qui ne trouveraient pas leur place dans le secteur commercial classique.

ADER : 10 rue champ Rochas – 38240 MEYLAN

Le « photocopillage » tue le livre

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^e et 3^e a, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L.122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle.

Couverture : *Arts'Print Numeric* – Condé-en-Normandie

© 2020, *Éditions Campus Ouvert*

<http://editionscampusouvert.wordpress.com/>

editions.campus-ouvert@orange.fr

ISBN : 979-10-90293-76-2

EAN : 9791090293762

Distribution : Éditions L'Harmattan, 16 rue des Écoles – 75005 Paris

www.librairieharmattan.com

diffusion.harmattan@wanadoo.fr

JACQUES PERCEBOIS

L'ÉNERGIE

**RACONTÉE À TRAVERS
QUELQUES DESTINS TRAGIQUES**

Éditions Campus Ouvert
2020

DU MÊME AUTEUR

Jean-Pierre Hansen et Jacques Percebois, *Énergie : économie et politiques*, 3^e édition, Préface de Marcel Boiteux et avant-propos de Jean Tirole, Bruxelles-Paris, Éditions de Boeck, 2019 (728 pages)

Jean-Pierre Hansen et Jacques Percebois, *Transitions électriques ; ce que l'Europe et les marchés n'ont pas su vous dire*, Préface de Gérard Mestrallet, Paris, Éditions Odile Jacob, 2017 (276 pages)

Christophe Bouneau, Michel Derdevet et Jacques Percebois, *Les réseaux électriques au cœur de la civilisation industrielle*, Préface d'Andris Piebalgs, 2007, Paris, Éditions Timée (174 pages)

SOMMAIRE

<i>Remerciements</i>	7
Avant-Propos	9
Chapitre 1	
Émilie du Châtelet	
« L'énergie cinétique et le carré de la vitesse »	13
Chapitre 2	
Antoine de Lavoisier et Philippe Lebon	
« Gaz à tous les étages »	21
Chapitre 3	
Stanley Jevons	
« L'homme qui craignait l'épuisement du charbon »	45
Chapitre 4	
Samuel Insull	
« Le magnat déchu de l'électricité »	67
Chapitre 5	
Rudolph Diesel	
« Un inventeur humaniste »	93
Chapitre 6	
Mohammad Mossadegh	
« Le pouvoir aux pays producteurs de pétrole »	105
Chapitre 7	
Lise Meitner	
« L'oubliée de la fission nucléaire »	125

Chapitre 8

Conrad Kilian

« L'inventeur du pétrole du Sahara » 145

Chapitre 9

Enrico Mattei

« L'Italien le plus puissant depuis Jules César » 161

Chapitre 10

Valeri Legassov

« Un scientifique désespéré » 177

Chapitre 11

Frank Ramsey

« À la recherche du tarif électrique optimal » 193

Et puisqu'il faut conclure... 211

Chapitre 5

Rudolph Diesel

« Un inventeur humaniste »



Disparition mystérieuse sur un bateau

Le matin du 30 septembre 1913 les collaborateurs de Rudolf Diesel sont inquiets. La cabine numéro 18 qu'il occupait à bord du Dresden, un paquebot allemand de la Great Eastern Railway Company parti la veille d'Anvers et qui doit arriver dans quelques heures à Harwich, au Nord-Est de Londres, est vide. Le lit n'est pas défait. Après avoir dîné la veille avec ses collaborateurs, Diesel s'était retiré vers 22h en leur demandant d'être réveillé vers 6 heures du matin le lendemain. Dix jours plus tard l'équipage d'un cargo néerlandais découvrit le cadavre d'un homme flottant sur la mer. Le corps est dans un tel état de décomposition que l'on renonce à le hisser à bord mais on récupère certains effets (des lunettes, un couteau, un portefeuille) qui permettront au fils du défunt, Eugen, de reconnaître formellement ces effets comme appartenant à son père. Un autre navire de pêcheurs belges naviguant dans l'estuaire de l'Escaut récupérera le corps qui sera autopsié à Anvers. Le médecin légiste notera une blessure à l'arrière du crâne faite avant la mort (Rudolph Diesel, *Wikipedia.org*).

L'homme visiblement est tombé par-dessus bord. Est-ce un accident, un suicide ? L'homme était un peu dépressif suite à de mauvaises affaires financières. Est-ce un crime ? L'hypothèse est envisagée car cet inventeur partait à Londres pour une négociation avec les responsables de la Royal Navy dans un contexte de fortes tensions politiques entre la Grande-Bretagne et l'Allemagne. On est à quelques mois du déclenchement de la Première Guerre mondiale. Certains y verront la main de l'état-major allemand. La fille de Rudolf Diesel penchera pour le suicide mais cela n'empêchera pas les hypothèses d'un assassinat de se développer. Le mystère ne sera jamais élucidé.

Un inventeur allemand pacifiste

Rudolf Diesel est né à Paris en 1858 de parents allemands immigrants. Il quitte la France pour Londres avec sa famille à l'âge de 12 ans, en 1870, lors de la guerre entre la France et la Prusse. Les Allemands qui y vivent doivent quitter le territoire. Il va ensuite faire des études en Allemagne à l'École Polytechnique Royale de Bavière et obtient son diplôme d'ingénieur en 1880. En 1892 il dépose un brevet devant l'Office Impérial de Berlin concernant un moteur révolutionnaire qui va attirer l'attention de Krupp et de Man (société qui fabrique des véhicules industriels) dont il sera le salarié durant quelques années. En 1893 il publie un ouvrage intitulé « Théorie et construction d'un moteur thermique destiné à supplanter la machine à vapeur ».

Ce moteur est conçu pour utiliser des combustibles moins coûteux que le charbon et Diesel pense avant tout aux huiles végétales ou aux huiles lourdes issues de la distillation du pétrole brut. Il s'agit de permettre aux artisans de faire face à la concurrence des gros industriels. Son moteur est avant tout destiné à des usages fixes et non à la mobilité. Lors de l'Exposition universelle de 1900 à Paris, Diesel présente un moteur de 1 960 cm³ tournant à 172 tours/minute et fonctionnant avec de l'huile d'arachide. Il obtiendra le grand prix de l'exposition.

L'originalité du moteur Diesel repose sur un allumage dans lequel le carburant est injecté à la fin de la compression, provoquant son inflammation en raison des températures élevées atteintes par cette compression. Il n'y a pas besoin d'enflammer le mélange carburant-air au moyen d'une bougie comme avec le moteur à essence. Ce moteur n'est pas au départ destiné à l'automobile mais aux petites installations industrielles, aux centrales électriques, aux navires, sous-marins voire aux locomotives. C'est bien plus tard que le moteur trouvera une application dans l'automobile grâce notamment à l'invention de la pompe à injection par le Français Lucien-Eugène Inchauspé et à la

technologie développée par l'Allemand Robert Bosch. C'est d'abord aux États-Unis que la traction ferroviaire diesel connaîtra un essor important à partir des années 1930. Le moteur diesel remplacera la locomotive à vapeur très gourmande en eau, d'autant que ces trains diesel-électricité auront une autonomie supérieure à celle des locomotives traditionnelles. Partout dans le monde les trains diesel s'imposeront tant que le réseau électrique ne permettra pas de faire appel à des locomotives alimentées par le réseau¹.

Le faible coût du combustible de ce moteur pouvant fonctionner avec le résidu du raffinage (les coupes lourdes comme le mazout) ou des huiles végétales le rendait particulièrement attractif pour la navigation navale. C'est un navire marchand danois, le *Selandia*, qui en 1912 fut le premier navire équipé d'un moteur diesel. La marine de guerre s'y intéressait pour ses sous-marins mais aussi pour les navires de surface car les navires utilisant le mazout pouvaient aller plus vite que ceux qui fonctionnaient alors au charbon, et surtout ils n'émettaient pas ce fameux panache de fumée noire qui les rendait repérables de loin. C'était en tout cas le point de vue de la Royal Navy et en particulier du Premier Lord de l'Amirauté, Winston Churchill. C'est lui qui décida en 1914 de faire passer la Navy du charbon au mazout (fioul lourd). C'est donc à l'invitation de l'amiral Fisher que Diesel se rendait à Londres, d'autant que l'accueil que lui avait réservé l'état-major allemand de la marine, et l'amiral von Tirpitz en particulier, n'avait pas été très bon. Certes Diesel était pacifiste et se désolait, semble-t-il, que son invention intéresse les militaires mais il avait également besoin d'argent et ce voyage à Londres s'accompagnait d'un espoir de contrats rémunérateurs².

Alors, qui avait intérêt à la disparition à 55 ans de Rudolf Diesel ? Beaucoup de monde : les raffineurs qui ne voulaient pas d'un moteur à huile végétale concurrençant les produits pétroliers, l'industrie du charbon qui voyait dans ce moteur un concurrent dangereux, l'état-major allemand surtout, qui voyait d'un mauvais œil ce compatriote se rapprocher un peu trop d'un probable futur ennemi et qui craignait une nouvelle « affaire Haussner ».

En février 1891 un Bavarois, Konrad Haussner avait fait breveter à Paris un système limitant le recul d'un canon car son invention n'avait pas retenu l'attention de l'état-major allemand. Cette invention retiendra en revanche l'attention de l'état-major français, et en particulier du Lieutenant-colonel Deport, qui s'en inspirera pour le célèbre « canon de 75 ». Ce canon sera le

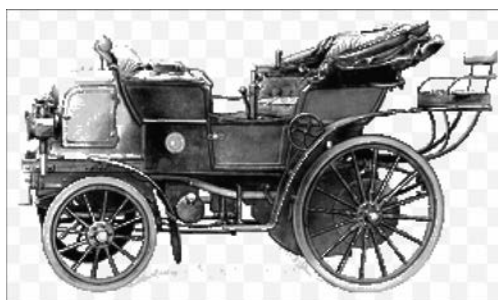
¹ Robert Nitske et Charles Wilson, « Rudolf Diesel, Pioneer of the Age of Power », Norman, University of Oklahoma Press, 1965.

² John Moon, « Rudolf Diesel and the Diesel Engine », Ed. Priory Press, 1974.

premier canon à tir rapide de l'époque, grâce à un frein hydraulique qui absorbe le recul du canon au moment des tirs. Le secret sur la mise au point de ce canon sera au cœur de l'Affaire Dreyfus. C'est d'avoir transmis les plans de ce canon, du système de frein hydraulique en particulier, qu'Alfred Dreyfus sera accusé, à tort. Craignant pour sa vie Haussner se réfugiera en Amérique du Sud.

Mais rien ne prouve que Diesel ait été assassiné sur ce bateau... Son nom deviendra un nom commun et les moteurs « diesel » vont connaître un succès foudroyant, et pas seulement dans l'automobile. C'est largement dans la production centralisée et décentralisée d'électricité que leur usage va se développer partout dans le monde, y compris dans les régions les plus reculées d'Afrique. Ce sont des moteurs faciles à utiliser et dont la longévité est proverbiale. Les générateurs de secours des centrales nucléaires sont des moteurs diesel comme on le verra à Fukushima ; en cas de panne du réseau électrique on fait partout appel à des groupes électrogènes de secours qui sont encore des moteurs diesel.

L'épopée du moteur diesel



Une voiture diesel à son origine

À ses débuts l'automobile à essence a dû faire face à deux concurrents, le véhicule à vapeur et le véhicule électrique. Des précurseurs comme l'Écossais Robert Anderson ou le Français Gaston Planté avaient construit des prototypes électriques fonctionnant avec des batteries (plomb-acide). À la fin des années 1890 il y avait à New York de très nombreux taxis électriques et en Europe les voitures électriques représentaient près du tiers du marché automobile. En 1899 la *Jamais contente*, véhicule électrique, fut la première automobile à dépasser les 100 km/heure. Deux facteurs expliquent le déclin progressif du véhicule électrique et le développement à grande échelle du véhicule à essence : le bas prix de l'essence et la faible autonomie

du véhicule électrique. La stratégie de l'industrie pétrolière a été de promouvoir la voiture à essence en commercialisant l'essence à un prix attractif. Elle a fait avec l'automobile ce que Rockefeller avait fait au début de l'ère pétrolière : distribuer gratuitement des lampes à pétrole pour que les consommateurs s'éclairent au pétrole lampant. En 1908 le lancement de la Ford T, deux fois moins chère qu'une voiture électrique, accéléra l'abandon des voitures électriques. La voiture à essence a vu ensuite son monopole contesté par la voiture diesel qui pouvait rouler avec des produits pétroliers comme avec des huiles végétales.

C'est en 1936 en Allemagne que la première voiture équipée d'un moteur diesel fut commercialisée ; il s'agissait de la Mercedes 260 D. Il faudra attendre 1955 en France pour voir un véhicule diesel commercialisé à grande échelle ; c'était la Peugeot 403. Il y eut certes des prototypes avant la Seconde Guerre mondiale, une Peugeot en 1921, une Daimler en 1923, une Citroën « Rosalie » en 1933. Le véhicule diesel est certes plus cher à l'achat qu'un véhicule équivalent à essence mais son moteur est plus robuste, sa longévité en moyenne plus grande et il est plus économique à l'usage car moins gourmand en carburant. À puissance similaire, un véhicule diesel émet environ 10% de moins de CO₂ qu'un véhicule à essence de même puissance, mais il rejette davantage de particules fines ce qui explique qu'il soit aujourd'hui délaissé. À cela s'ajoute le fait que la fiscalité sur le diesel est sensiblement plus faible que celle qui pèse sur l'essence, en France tout spécialement.

Une des raisons avancées pour expliquer cette faveur fiscale en France, mais que d'aucuns contestent, est que l'accélération du programme électro-nucléaire en 1974 au moment des chocs pétroliers, avait tendance à mettre sur le marché des quantités importantes de fioul lourd qui jusqu'alors été achetées par EDF pour produire de l'électricité dans les centrales au fioul. Comme il est difficile de modifier la structure du raffinage il faut trouver un débouché pour chaque coupe de produits pétroliers à la sortie des raffineries. Les pouvoirs publics ont alors convaincu les constructeurs automobiles français de développer le véhicule diesel afin d'écouler ce surplus de fioul lourd et ont facilité sa diffusion par une fiscalité attrayante. La France importe d'ailleurs traditionnellement du fioul lourd de Russie ou des États-Unis mais exporte de l'essence. En réalité le diesel profitait déjà d'une fiscalité avantageuse depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, à une époque où l'on voulait favoriser le transport routier et l'agriculture dont les tracteurs utilisent traditionnellement ce type de moteur.

En 2012 le pic du diesel est atteint en France avec deux tiers d'immatriculations « diesel » contre un tiers d'immatriculations « essence ». Les choses vont radicalement changer avec le « *dieseldate* » fin 2015. C'est la révélation du scandale de triche concernant les émissions polluantes du groupe Volkswagen. Le diesel est aujourd'hui en perte de vitesse un peu partout en Europe. En France la proportion s'est inversée fin 2019 : deux tiers « essence » et un tiers « diesel ».

Quelle sera demain la place de l'automobile dans la transition énergétique ? Cela dépend de la vision que l'on a de la mobilité au sein des territoires et des agglomérations. Il faut ensuite savoir quel type d'automobile on souhaite privilégier : le véhicule thermique ? Le véhicule électrique ou à hydrogène ? Le véhicule autonome ?

Mobilité et transition énergétique

La lutte contre le réchauffement climatique va accorder un poids croissant aux territoires car c'est dans l'organisation de l'espace que certaines solutions seront trouvées, en particulier en ce qui concerne la mobilité. Le processus d'urbanisation se poursuit avec des villes qui s'étendent spatialement mais où les inégalités entre quartiers ont tendance à s'accroître. C'est souvent le prix de l'immobilier qui est le principal facteur discriminant de localisation des populations et la gestion des périphéries devient un problème sécuritaire de plus en plus contraignant. En même temps les zones rurales se dépeuplent de façon concomitante avec la fermeture des services publics (médecine, école, poste, télécommunications, réseaux ferrés et routiers). Rappelons que les 10 premières métropoles américaines représentent 34% de la richesse aux États-Unis et le processus ne fait que s'accroître. La montée des préoccupations environnementales conditionne de plus en plus la recherche d'une énergie « durable » au niveau des principaux usages, notamment ceux qui concernent la mobilité et l'habitat puisque ce sont les deux secteurs les plus consommateurs d'énergie et les plus émetteurs de CO₂ (près de 30% pour le transport en Europe). L'automobile est la première source d'émission de CO₂ du secteur européen des transports avec près de 44% des émissions, devant les camions, camionnettes et bus (19%), le transport aérien (14%), le transport maritime (13%) et le rail (moins de 1%).

On a d'un côté la France des ronds-points et des voitures diesel et de l'autre la France des bicyclettes et des trottinettes. Les populations les plus modestes, qui ont fui les centres urbains en quête d'un logement financièrement abordable, ne peuvent pas renoncer à la voiture. Les populations les plus fragiles dites en situation de précarité énergétique cumulent un triple

handicap : un faible revenu, qui les met souvent sous le seuil de pauvreté, une facture de l'énergie liée au logement et à la mobilité élevée en proportion du revenu (parfois jusqu'à 20%), une situation de mal logement. Il y a ceux qui ne peuvent pas payer leur facture et ceux qui, pour la payer, se privent au détriment de leur santé ou de leur alimentation. De ce fait ces précaires sont particulièrement pénalisés lorsque des mesures comme la taxe carbone, le péage urbain ou le stationnement payant sont introduites massivement. À l'inverse les cadres qui peuvent se loger dans les centres-villes ont tendance à délaissier la voiture. Beaucoup de jeunes ne passent même plus le permis et l'acquisition d'une automobile n'est plus nécessairement la priorité en matière de reconnaissance sociale. C'est une fracture à la fois géographique et sociale car la ville accueille plutôt une population de cadres tandis que les personnes à revenu modeste ou en situation de précarité énergétique se localisent plutôt dans la périphérie et les campagnes. Le potentiel de transports publics est élevé en ville et souvent défaillant en zone rurale, ce qui aggrave encore les choses.

La transition numérique accompagne la transition énergétique, et elle envahit toutes les activités : elle permet d'économiser l'énergie mais elle en consomme aussi beaucoup ; elle facilite les relations sociales grâce aux réseaux et plateformes numériques mais elle devient aussi un facteur de dépendance ou d'exclusion pour certaines populations ; elle génère de nouvelles activités économiques mais elle est aussi source de chômage lorsque l'automatisation économise de la main-d'œuvre. On parle de « villes intelligentes », de quartiers connectés via des *blockchains*, de régions centrées sur l'intelligence artificielle et même de véhicule « autonome » qui se conduit sans l'intervention humaine (dans l'habitacle du moins). Mais tous ces objets connectés consomment des métaux rares ou stratégiques, souvent importés, et ils sont loin d'être accessibles à tous.

L'éventail technologique est large entre le véhicule thermique classique à essence ou diesel et le véhicule électrique ou à hydrogène, en passant par les véhicules hybrides³. Ce sont les efforts en matière de recherche-développement mais aussi les mesures réglementaires et incitatives prises par les pouvoirs publics nationaux et locaux qui vont modeler le paysage futur. Les pouvoirs publics disposent de trois types d'outils pour infléchir les choix des usagers : la norme, la taxe, les aides financières. En matière de normes le potentiel d'intervention est très vaste : interdiction de l'accès au centre-ville,

³ Dominique Auverlot *et al.*, « France Stratégie. Rapport sur les politiques publiques en faveur des véhicules à très faibles émissions », mai 2018.

fixation de normes d'émissions de polluants, régulation de la vitesse, stationnement interdit ou réglementé, voies réservées aux véhicules peu polluants, gratuité des transports collectifs, etc. On peut favoriser l'usage du véhicule électrique en multipliant les bornes de recharge. On peut aussi taxer les véhicules polluants (péages urbains, stationnement payant) ou subventionner massivement les transports collectifs (tickets à prix réduit voire gratuité des transports publics), développer les pistes cyclables. En matière d'aides financières de nombreuses solutions sont également disponibles (primes à la conversion, système du bonus/malus en fonction de la puissance du véhicule ou de son degré de pollution). Il faut évaluer l'impact économique mais aussi social des mesures prises.

Aider massivement le véhicule électrique c'est souvent aider les populations à revenu élevé car le prix d'achat élevé d'un véhicule électrique est encore aujourd'hui une « barrière à l'entrée » pour les populations les plus modestes. Il faut donc s'assurer que les choix technologiques et les décisions pratiques faits au niveau local comme à l'échelle nationale ne vont pas ajouter une fracture supplémentaire à la fracture numérique et à la fracture sociale que l'on constate déjà. Un marché de l'occasion pour le véhicule électrique est par exemple indispensable si l'on veut que des populations modestes puissent choisir ce mode de mobilité. Or un tel marché est encore trop étroit aujourd'hui. Le marché de l'occasion est en France, comme dans la plupart des pays, plus important que le marché du neuf en termes de véhicules thermiques vendus chaque année.

Véhicule électrique ou véhicule à hydrogène ?

Le véhicule électrique souffre aujourd'hui encore de trois handicaps : son prix est relativement élevé par rapport au véhicule thermique, son autonomie kilométrique demeure limitée et la recharge des batteries est compliquée en raison du manque de points de recharge et du temps de recharge élevé. Le véhicule à hydrogène a une bien meilleure autonomie mais il se heurte aux mêmes deux autres obstacles : prix élevé et manque de points de recharge. Le temps de recharge est en revanche sensiblement plus court⁴.

Fin 2019 on estimait à 7 millions le nombre de véhicules électriques dans le monde soit à peine 0,5% du parc mondial. Les objectifs de l'Union européenne en matière de « décarbonation » du secteur automobile sont ambitieux. En 2019 environ 60% des immatriculations concernaient des

⁴ Philippe Boucly, « Transition énergétique : l'hydrogène, vecteur des possibles », *Revue de l'Énergie*, n° 644, mai-juin 2019.

véhicules à essence au sein de l'Union, 29% des véhicules diesel, 6% des véhicules hybrides, 3% des véhicules électriques, et 2% des véhicules à gaz. Les objectifs d'immatriculations pour 2030 sont les suivants : 65% de véhicules hybrides à essence, 22% de véhicules électriques, 8% de véhicules à gaz « propre », 4% de véhicules hybrides diesel et 1% de véhicules à hydrogène. La PPE (Programmation Pluriannuelle de l'Énergie) adoptée par la France prévoit 3 millions de véhicules électriques, 2 millions de véhicules hybrides en 2028 contre un peu plus de 220 000 véhicules électriques en circulation en 2019 (sur un parc de 39,5 millions de véhicules). Il est prévu d'implanter 100 000 points de recharge électrique mais aussi près de 1 000 stations à hydrogène à cet horizon. Les pouvoirs publics comptent sur la logique dite du « basculement » pour promouvoir les véhicules électriques ou à hydrogène. La thèse développée dans les travaux de Brian Arthur⁵ est de dire que les gens hésitent à passer au véhicule électrique mais se décident à le faire lorsqu'ils voient que la proportion de ceux qui ont basculé dépasse un certain seuil. Face à une nouvelle technologie, les consommateurs adoptent une attitude prudente et attentiste dans un premier temps, mais décident ensuite de « basculer » dès lors qu'un certain seuil de diffusion de cette technologie est dépassé. Ce seuil varie selon les technologies mais lorsqu'il est atteint le processus s'accélère.

Les biocarburants, qui avaient un temps la faveur des pouvoirs publics, sont aujourd'hui critiqués en raison de la concurrence qu'ils exercent sur la production de produits agricoles destinés à l'alimentation. On l'a vu notamment au Brésil. La compétition sera donc principalement entre véhicule hybride, véhicule électrique et véhicule à hydrogène dans sa version *pile à combustible* (l'inverse de l'électrolyse de l'eau). Encore faut-il que l'électricité qui alimente la voiture électrique soit bien sans carbone (d'origine nucléaire ou renouvelable) sinon c'est simplement déplacer le problème des émissions de l'aval vers l'amont. Encore faut-il aussi que le combustible hydrogène utilisé soit bien lui aussi sans carbone, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui puisque l'hydrogène est très largement d'origine fossile (produit à partir des hydrocarbures notamment). Les perspectives de l'hydrogène « vert » semblent également prometteuses dans le transport ferroviaire comme dans le transport aérien. Les véhicules qui, comme certains bus, utilisent du gaz naturel (GNV, pour *gaz naturel véhicule*) ou des GPL (*gaz de pétrole liquéfié*), ont des vertus puisqu'ils émettent moins de CO₂ que les véhicules à essence mais ils

⁵ Brian Arthur, « Competing Technologies, Increasing Returns and Lock-In by Historical Events », *Economic Journal*, vol 99, N° 394, 1989.

demeurent tout de même *carbonés*. Utiliser du biogaz est une solution mais son potentiel semble, en France notamment, moins prometteur que celui des véhicules électriques.

Batteries et métaux rares, le point faible

Beaucoup de pays européens, dont la France, envisagent d'interdire la production de véhicules thermiques à l'horizon 2040, certains même avant. Le développement du véhicule électrique se heurte encore au poids élevé du coût des batteries (30 à 40% du prix du véhicule, ce qui explique que les batteries soient en général louées). Ce coût devrait chuter à 20% du prix du véhicule en 2025 selon le cabinet Bloomberg. Les batteries utilisées aujourd'hui sont pour l'essentiel des batteries lithium-ion mais des recherches sont entreprises partout dans le monde pour mettre au point des batteries plus performantes du type sodium-soufre ou lithium-soufre par exemple. On pense également à une batterie « tout solide » ou à une batterie aluminium-air ; l'aluminium est un produit largement disponible à la différence du lithium dont les réserves sont limitées. Contrairement à une idée répandue les batteries n'utilisent pas beaucoup de *terres rares*, à la différence des moteurs par exemple. Ces terres rares constituent un ensemble de 17 éléments métalliques, du groupe des lanthanides pour l'essentiel, et elles ne sont pas vraiment rares. Leur caractéristique est seulement d'être présentes en petite quantité dans beaucoup de minerais. Leur production, très polluante, est en revanche concentrée à près de 85% en Chine. Pour les batteries c'est le cobalt qui est une ressource rare et sa production est là encore géographiquement très concentrée (au Congo pour l'essentiel)⁶. L'Union européenne a décidé récemment de lancer « l'Airbus des batteries » pour limiter sa très forte dépendance à l'égard des constructeurs asiatiques. Parmi les dix premiers fabricants mondiaux de batteries, sept sont chinois (dont CATL qui détient 24% du marché mondial), deux sont coréens (dont Samsung) et un est japonais (Panasonic).

Le choix de l'hydrogène passera par la pile à combustible (PAC) qui transforme l'hydrogène en électricité et en vapeur d'eau. L'hydrogène, qui n'existe quasiment pas à l'état naturel (un peu en mer mais son exploitation est très coûteuse) devrait dans le futur être fabriqué grâce aux renouvelables ou au nucléaire. L'électricité renouvelable excédentaire permettra de faire l'électrolyse de l'eau, ce qui aura deux avantages : stocker les excédents

⁶ ADEME, « Terres rares, énergies renouvelables et stockage d'énergie », Fiche technique, novembre 2019.

d'électricité solaire ou éolienne (et produire ensuite de l'électricité grâce à la méthanation) ou utiliser cet hydrogène pour la mobilité dans les transports, que ce soit pour des automobiles, des camions ou des trains, voire des avions. Il existe déjà des trains fonctionnant à l'hydrogène, en Allemagne par exemple, et beaucoup songent à transformer les trains diesel en trains roulant à l'hydrogène liquide. L'hydrogène stocké peut aussi être converti en électricité en l'associant à du CO₂, ce qui donne du méthane qui peut servir de combustible dans une turbine à gaz. Le véhicule à hydrogène a deux atouts par rapport au véhicule électrique utilisant les batteries : une meilleure autonomie (700 kilomètres) et surtout un temps de recharge beaucoup plus court (moins de 5 minutes). Notons que la production d'hydrogène « vert » peut se faire en France notamment à partir de l'électricité nucléaire qui est « décarbonée ».

Il est probable que dans le futur le marché de la mobilité sera divisé en trois compartiments : le compartiment de la mobilité dite « lourde », celle des camions, des bus ou des navires, qui sera dominé par l'hydrogène ; celui du transport de marchandises sur longue distance où domineront les véhicules hybrides rechargeables ; et celui de la mobilité urbaine où le véhicule électrique utilisant des batteries sera le moyen le plus développé. Pour le transport aérien le champ des possibles est encore très ouvert (biocarburants, électricité, hydrogène).

L'invention de Rudolf Diesel a rendu et rend encore beaucoup de services à l'Humanité. Mais elle est condamnée à terme tant qu'elle utilisera des combustibles fossiles. N'oublions pas cependant que Diesel l'avait mise au point pour des huiles végétales. Une seconde vie est donc possible avec des biocarburants à condition que ceux-ci ne compromettent pas les usages liés à l'alimentation, et sous réserve que le progrès technique ne rende pas obsolète cette technologie.