

Repositório ISCTE-IUL

Deposited in *Repositório ISCTE-IUL*:

2026-01-22

Deposited version:

Accepted Version

Peer-review status of attached file:

Peer-reviewed

Citation for published item:

Bento, N. (2025). L'histoire se répète-t-elle ?: Leçons des transitions technologiques passées et des faux départs de l'économie de l'hydrogène. In Nathalie Kroichvili et Nicolas Simoncini (Ed.), L'hydrogène par les sciences humaines et sociales. (pp. 17-41).: Pôle éditorial de l'université de technologie de Belfort-Montbéliard.

Further information on publisher's website:

[10.3917/utbm.kroic.2025.01.0017](https://dx.doi.org/10.3917/utbm.kroic.2025.01.0017)

Publisher's copyright statement:

This is the peer reviewed version of the following article: Bento, N. (2025). L'histoire se répète-t-elle ?: Leçons des transitions technologiques passées et des faux départs de l'économie de l'hydrogène. In Nathalie Kroichvili et Nicolas Simoncini (Ed.), L'hydrogène par les sciences humaines et sociales. (pp. 17-41).: Pôle éditorial de l'université de technologie de Belfort-Montbéliard., which has been published in final form at <https://dx.doi.org/10.3917/utbm.kroic.2025.01.0017>. This article may be used for non-commercial purposes in accordance with the Publisher's Terms and Conditions for self-archiving.

Use policy

Creative Commons CC BY 4.0

The full-text may be used and/or reproduced, and given to third parties in any format or medium, without prior permission or charge, for personal research or study, educational, or not-for-profit purposes provided that:

- a full bibliographic reference is made to the original source
- a link is made to the metadata record in the Repository
- the full-text is not changed in any way

The full-text must not be sold in any format or medium without the formal permission of the copyright holders.

L'histoire se répète-t-elle ? Leçons des transitions technologiques passées et des faux-départs de l'économie de l'hydrogène

Nuno Bento

Instituto Universitário de Lisboa (ISCTE-IUL), DINÂMIA'CET, Avenida das Forças Armadas, Edifício ISCTE-IUL, Sala 2W4-d, 1649-026 Lisboa, Portugal, (00 351) 916416087, nuno.bento@iscte.pt

À paraître dans l'ouvrage collectif « Hydrogène et Sciences Humaines et Sociales », Automne 2024.

Résumé

Pour décarboner l'énergie, plusieurs visions et scénarios ont été proposés au fil du temps concernant la transition vers une économie de l'hydrogène. Cette recherche identifie les principales propositions (marchés-cible, (de-)centralisation du système, déploiement des infrastructures, etc.) qui ont été formulées aux différentes étapes de l'histoire et tire des leçons des avancées et des échecs. Pour cela, nous analysons la dynamique historique de substitution technologique, en comparant le temps de formation des innovations émergentes et de déclin des technologies existantes. L'échantillon de 14 processus de transition comprend différents types de technologies (communication, biens de consommation, transport, industrie, fourniture d'énergie), à différentes périodes (récente et ancienne). Les résultats mettent en évidence la lenteur des substitutions technologiques dans les transports et l'industrie dans le passé. Une analyse particulière de l'effet du coût et de l'infrastructure dans la transition en cours vers la voiture électrique en Norvège révèle que la baisse des coûts de ces voitures a clairement précédé la dynamique de substitution technologique, laquelle a anticipé l'augmentation des bornes de recharge. Le chapitre conclut par la présentation de stratégies fondées sur l'expérience historique qui sont les plus à même d'accélérer la transition vers les technologies de l'hydrogène dans l'avenir.

Mots-clés : transitions historiques ; phase formative ; déclin ; technologies énergétiques ; hydrogène et piles à combustible.

Abstract

To decarbonize the energy system, several visions and scenarios have been proposed over time regarding the transition to a hydrogen economy. This research identifies the main proposals that

have been made at different stages of history and draws lessons from the advances and failures. For this, we analyze the historical dynamics of technological substitution, comparing the formation time of emerging innovations and the decline of existing technologies. The sample of 14 transition processes includes different types of technologies (communication, consumer goods, transport, industry, energy supply), at different periods (recent and old). The results highlight the slowness of technological substitutions in transport and industry in the past. A particular analysis of the effect of cost and infrastructure in the current transition to the electric car in Norway reveals that the fall in the cost of these cars clearly preceded the dynamics of technological substitution, which anticipated the increase in charging stations. The chapter concludes by presenting strategies based on historical experience that are most likely to accelerate the transition to hydrogen technologies in the future.

Keywords: historical transitions; formative phase; decline; energy technologies; hydrogen and fuel cells.

1. Introduction

Si le changement technologique s'est trouvé au fondement des révolutions industrielles (Freeman, 2019), la transition vers une économie sobre en carbone entraînera certainement à son tour des bouleversements économiques et sociaux majeurs pour notre époque. La nécessité d'accélérer la décarbonation offre de nouvelles opportunités à l'hydrogène (H_2) et aux piles à combustible (PAC), en particulier dans les secteurs où il est difficile de réduire les émissions de gaz à effet de serre, comme le transport de longue distance, l'industrie ou le stockage d'électricité (IEA, 2019, 2022). Cependant, la diffusion de l'hydrogène dépend à la fois du développement de technologies compétitives et de l'existence d'une infrastructure de soutien. En outre, de grandes incertitudes subsistent quant au potentiel degré de maturité et de compétitivité des technologies de l'hydrogène pour contribuer aux objectifs de décarbonation d'ici à 2050 (Bento, 2020).

La substitution technologique est une composante cruciale de la transition. Dans de nombreux cas, la diffusion d'une nouvelle technologie se fait grâce à l'abandon graduel des technologies existantes (Rosenbloom & Rinscheid, 2020). Ce fut le cas de la transition vers les ampoules plus performantes à technologie LED (Stegmaier et al., 2021), de la substitution des procédés de Bessemer et de Martin-Siemens (*open-hearth*) par des fours à oxygène et à arc électrique dans la fabrication d'acier (Poznanski, 1986), ou du

remplacement du cheval par la voiture dans les transports (Grubler, 2003).¹ En général, la diffusion de la nouvelle technologie dépend des interactions avec les technologies anciennes et les rapports peuvent être de concurrence ou de complémentarité (Utterback et al., 2019). Dans ce dernier cas, la nouvelle technologie bénéficie des parts de marché de la technologie existante pour progresser. Par exemple, le développement du bateau à vapeur au XIXème siècle a bénéficié de plusieurs innovations technologiques, sociales, etc., développées pour le bateau à voile, qu'il a fini par remplacer (Geels, 2002). Mais la nouvelle technologie peut aussi être en compétition avec une autre innovation technologique pour la substitution de la technologie existante. C'est le cas actuellement de la voiture à pile à combustible à hydrogène et de la voiture électrique à batterie qui sont en concurrence pour le remplacement des voitures thermiques dans les transports (Trencher & Wesseling, 2022).

Par le passé, plusieurs visions et scénarios de substitution technologique ont été proposés pour la transition vers une économie de l'hydrogène (Dunn, 2002 ; Suurs, 2009 ; Staffell et al., 2019). Une série de projets d'expérimentation et de commercialisation dans les applications portables, stationnaires et mobiles ont vu le jour avec des résultats mitigés (Bento, 2020). Au moment où la lutte contre le changement climatique rend nécessaire l'accélération de la substitution des énergies fossiles, il est important de tirer les leçons des faux-départs de l'économie de l'hydrogène, ainsi que des substitutions technologiques opérées dans le passé pour éviter de répéter les mêmes erreurs.

Ainsi, la question centrale de cet article est la suivante : Quelles sont les meilleures stratégies pour accélérer la diffusion de l'hydrogène vers la décarbonation ? Pour cela, nous passons en revue les principales stratégies qui ont été envisagées pour le développement des technologies de l'hydrogène essentiellement comme vecteur énergétique ou hydrogène-énergie. Ces stratégies sont ensuite comparées aux exemples réussis de substitution technologique dans le passé. Notre approche consiste à étudier la substitution technologique en termes de temps nécessaire à l'émergence de nouvelles technologies et au déclin des technologies existantes. Cela nous permet d'identifier un ensemble de stratégies validées par l'expérience qui informent les stratégies pour le démarrage et la dissémination des technologies de l'hydrogène.

¹ Très souvent la technologie remplacée ne disparaît pas mais garde une partie résiduelle du marché, comme signale Poznanski (1986). Par exemple, le cheval n'est presque plus utilisé pour le transport dans le monde (au moins dans les pays développés) aujourd'hui en dehors de quelques cas très précis comme le divertissement.

Ce chapitre est structuré en six parties. Après cette introduction, la Section 2 rappelle les hypothèses fréquemment présentées dans les études sur les technologies de l'hydrogène. La Section 3 reprend les principales théories sur la diffusion et substitution technologique. La Section 4 expose la méthodologie développée pour cette étude et les principales sources de données, ainsi les résultats des analyses relatives à la substitution technologique. La Section 5 discute les hypothèses habituellement formulées vis-à-vis du développement des technologies de l'hydrogène à la lumière de la littérature existante et des résultats empiriques, en tirant des leçons pour les études futures sur la transition vers une économie de l'hydrogène.

2. Visions et hypothèses proposées autour de l'économie de l'hydrogène

Une définition marquante de l'économie de l'hydrogène a été proposée par Bockris :

« to reduce the spread of pollutants from the burning of fossil fuels (...) the building up of an energy system in which the medium is hydrogen. A system of industry, transportation, and household energy which depends on piped hydrogen as a fuel is called a "hydrogen economy". » (Bockris, 1977: 549)²

Cette définition met en exergue les motivations environnementales de la transition vers une économie fondée sur l'hydrogène, ainsi que les composantes-clés pour la réalisation d'une telle vision. Ces composantes incluent les principaux éléments de la chaîne de valeur de l'hydrogène : production ; stockage ; transport ; distribution ; et usages. Au fil du temps, différentes visions ont été présentées avec diverses combinaisons des éléments de la chaîne. Ces configurations peuvent notamment changer par rapport au caractère plus ou moins décentralisé de la production de l'hydrogène, ainsi que par rapport au type d'usages principaux (fourniture de chaleur et électricité dans les bâtiments, transport, industrie, énergie, stockage d'énergie, etc.) (Bento, 2010 ; Eames & McDowall, 2005 ; Staffell et al., 2019).

² En traduction libre de l'anglais : « pour réduire la dispersion des polluants issus de la combustion des énergies fossiles (...) la constitution d'un système énergétique dont le moyen est l'hydrogène. Un système énergétique pour l'industrie, le transport et le résidentiel qui dépend de l'hydrogène canalisé comme carburant est appelé une "économie de l'hydrogène"».

Le contexte spatial et temporel a influencé l'évolution des visions autour de l'économie de l'hydrogène. La première expérience d'utilisation de l'hydrogène-énergie à grande échelle a été l'usage du gaz de ville (essentiellement du gaz de houille contenant un mix de monoxyde de carbone et hydrogène) dans les principales villes européennes du XIX^e siècle (Paquier & Williot, 2005). Dans un premier temps, le gaz de ville a été utilisé pour l'éclairage et, plus tard, pour les usages moteurs et calorifiques. Les principales villes européennes ont commencé à se doter de réseaux de distribution du gaz de ville produit dans des usines à gaz, d'abord à partir de la distillation du bois, puis à partir du charbon (Bento, 2008). La première démonstration a été faite à Paris en 1803. Depuis, l'utilisation du gaz de ville s'est étendue graduellement dans les espaces urbains partout en Europe. A partir des années 1910, le gaz de ville souffre de la concurrence de l'électricité, surtout pour l'éclairage, et à partir des années 1940, il cède progressivement sa place au gaz naturel à la suite des découvertes de grands gisements en Europe.

L'histoire moderne de l'hydrogène-énergie a été marquée par des avancées et des reculs, liés notamment à l'évolution de la technologie de la pile à combustible et du soutien des Etats, ce qui a eu un effet sur les perspectives présentées dans les périodes suivantes. Passons en revue les visions marquantes de l'économie de l'hydrogène (H₂) au cours du siècle dernier³ :

- Années 1918 - 1950 : marquées par la volonté d'autonomie énergétique, l'intérêt pour l'H₂ provenant de l'énergie éolienne et l'utilisation précoce de l'hydrogène dans les transports et l'industrie ;
- Années 1950 - 1973 : marquées par la demande du programme spatial américain en LH₂ (hydrogène liquide) et en piles à combustible (PAC). Intérêt pour l'H₂ produit à partir de l'énergie solaire. Les progrès de la technologie des PAC frustrent les attentes, sauf aux États-Unis pour les applications spatiales et la cogénération (CHP) et en France où s'observe une augmentation des recherches scientifiques et techniques autour des PAC pour diverses applications (Simoncini, 2019) ;
- Années 1970 - 1990 : contexte marqué par la crise pétrolière et l'accroissement des préoccupations liées à la pollution de l'air et au changement climatique. Les

³ Cette présentation se base surtout sur les descriptions développées dans Dunn (2002), Suurs (2009), Bento (2010) et IEA (2019).

percées technologiques ravivent l'intérêt pour l'H₂ et la PAC. Intérêt pour l'H₂ produit à partir de l'énergie nucléaire ;

- Années 1990 - 1999 : la baisse des prix du pétrole et les coûts élevés des technologies d'hydrogène réduisent le soutien public aux PAC pour la cogénération, malgré les progrès réalisés dans la nouvelle génération de piles à membrane échangeuse de protons (PEMFC, pour le sigle anglais) ;
- Années 2000 - 2016 : les systèmes énergétiques durables prennent une place importante dans l'agenda politique, notamment dans les transports. Les questions climatiques et de sécurité de l'approvisionnement jouent également un rôle-clé. Le programme californien voiture zéro-émission (ZEV, pour le sigle anglais) déclenche plus d'investissements en recherche, développement et démonstration (RD&D) dans les PAC. L'UE finance aussi des démonstrateurs à grande échelle et adopte une réglementation sur la qualité de l'air. L'absence de percées technologiques et l'arrivée de nouvelles alternatives (principalement la voiture électrique à batterie) conduit à un nouvel effondrement des anticipations sur les technologies de l'hydrogène ;
- 2017 - aujourd'hui : l'Accord de Paris et l'urgence climatique relancent l'intérêt pour l'H₂. Nouvel accent mis sur l'H₂ produit à partir des énergies renouvelables (H₂ vert) et les secteurs d'usages difficiles à décarboner (industrie, transport longue distance, stockage d'énergie).

Les nombreuses visions et analyses qui ont été publiées présentent une série d'hypothèses partagées sur la meilleure façon d'organiser le démarrage et l'expansion de l'hydrogène-énergie. Nous repérons quatre hypothèses principales qui ont souvent été utilisées dans ces documents :

1. Les nouveaux systèmes peuvent rapidement remplacer les anciens (e.g., Rifkin, 2007 ; Sovacool, 2016) ;
2. Le secteur des transports présente le plus grand potentiel pour que l'H₂ et les PAC réduisent les émissions le plus rapidement (e.g., Shell, 2017, 2001) ;
3. Les grands projets comme la production centralisée d'H₂ permettent une diffusion plus rapide et à moindre coût (e.g., Alverà, 2021 ; Shell, 2017 ; Plotkin, 2007) ;
4. Les infrastructures précèdent légèrement les baisses de prix et le développement de la demande (e.g., European Commission (2014) - AFID directive

(2014/94/EU) ; IEA, 2019 ; Leibowicz, 2018 ; Hu & Green, 2011 ; Sperling & Ogden, 2006).

Ces quatre hypothèses caractérisent une partie représentative des études sur l'économie de l'hydrogène. Cependant, certaines études n'ont pas partagé toutes ou quelques suppositions présentées ci-dessus. Une notable exception aux hypothèses 3 et 4 est Lovins et al. (1999) qui prônent le développement d'un système plus décentralisé et efficient par rapport au système actuel – une perspective, connue sous le nom de *soft energy path*⁴ qui trouve ses origines dans les années 1970 et qui conteste la vision fondée sur l'utilisation de l'énergie atomique pour satisfaire la demande alors grandissante en énergie (Fressoz, 2022). Dans les prochains chapitres, certaines hypothèses seront comparées aux conclusions de la revue de la littérature (Section 3) et à l'expérience historique de la substitution technologique (Section 4).

3. Substitution technologique dans le processus de transition soutenable : une brève revue de la littérature

La substitution des technologies polluantes par des technologies plus propres apparaît cruciale pour répondre à l'urgence climatique – dans le cadre d'une approche globale qui doit notamment inclure le changement des comportements (IPCC, 2023). Celle-ci résulte de l'interaction entre des dynamiques de formation et de déclin technologique.

Les études sur l'évolution des technologies mettent l'accent sur la complexité des objets, le développement par étapes et les interactions entre technologies (Arthur, 2009). Deux approches théoriques expliquent l'évolution technologique (Coccia, 2019). D'une part, les théories traditionnelles basées sur le processus de substitution à l'issue de la compétition entre la nouvelle et l'ancienne technologie (Fisher & Pry, 1971 ; Pistorius & Utterback, 1997) ; d'autre part, les théories de l'interaction multimodale entre les technologies qui admettent des synergies et des avantages réciproques (Sandén et al., 2011 ; Utterback et al., 2019). L'automobile a clairement substitué les chevaux pour les

⁴ Stratégies sobres en énergie, en traduction libre.

transports, dans les pays développés pendant la première moitié du XXème siècle, alors que le charbon cohabite encore dans le mix énergétique de beaucoup d'autres pays, en dépit de l'utilisation d'autres énergies fossiles (pétrole ou gaz naturel) et des énergies renouvelables (Fressoz, 2022). Cependant, on recense plusieurs exemples de relation à la fois de compétition et de coopération entre nouvelle et ancienne technologie. Par exemple, l'introduction du téléphone portable a élargi les possibilités de contact des téléphones fixes, mais, avec le temps, l'augmentation des abonnés à la téléphonie mobile a entraîné la baisse du nombre d'abonnés à la ligne fixe (Bento, 2016).

La durée est souvent une variable centrale des études de la substitution technologique. Celle-ci peut varier d'une ou deux décennies comme la transition du cheval à l'automobile pour les transports dans les années 1920 aux États-Unis, jusqu'à un demi-siècle, voire plus. Les grandes transitions énergétiques dans l'histoire contemporaine se sont étalées sur plusieurs décennies, voire plus d'un siècle (130 ans) dans le cas du remplacement progressif de la biomasse par le charbon, le pétrole et le gaz naturel comme principales sources d'énergie dans le monde (Grubler, 2012 ; Grubler & Wilson, 2014).

Plusieurs facteurs expliquent la plus ou moins grande durée de la substitution technologique (cf. revue de la littérature de Grubler, 2012, 2003, Rogers, 2003). Ainsi, la substitution peut être rallongée par l'effet de la taille du marché (les systèmes plus grands mettent plus de temps à changer), la durée de vie et les coûts des équipements (les technologies le plus intensives en capital sont plus longues à remplacer), l'interdépendance technologique (les technologies complexes qui dépendent d'autres technologies sont plus difficiles à changer) et les besoins en infrastructures (voir aussi Wilson et al., 2020). Les infrastructures, en particulier, se déploient souvent à grande échelle et ont des durées de vie longues. Elles ralentissent la transition en fonction du montant des investissements effectués (Grubler, 2003), du type de flux et des relations multi-acteurs complexes (usagers, producteurs, distributeurs, régulateurs, etc.) (Frantzeskaki & Loorbach, 2010). Pour cette raison, les infrastructures de transport ou d'énergie contemporaines ont pris jusqu'à un siècle pour se développer complètement (Grubler, 2003).

D'autres facteurs peuvent accélérer la substitution technologique. Parmi ceux-ci figurent l'avantage relatif (les nouvelles technologies ayant des avantages en termes de performances, efficience ou coûts peuvent remplacer plus rapidement les systèmes existants) et l'existence de marchés niches initiaux (permettant l'expérimentation et

l’élargissement plus rapide de la production des nouvelles technologies). L’accroissement de la production renforce les avantages comparatifs des technologies émergentes par l’effet des économies d’apprentissage dans l’usage et la production, les économies d’échelle et les améliorations dans la production grâce à la plus grande efficience dans l’incorporation de matériaux entrants et l’automation (Lewis & Nemet, 2021). Récemment, le solaire photovoltaïque et les ampoules LED ont connu des réductions importantes de coûts et des améliorations des performances en parallèle de leur déploiement, ce qui a renforcé leur compétitivité. En fait, la recherche sur la transition historique des technologies montre que les petites technologies modulaires peuvent progresser plus vite que les grandes technologies (Wilson et al., 2020 ; Lovins et al., 2018). En effet, les technologies plus petites ou granulaires, telles que le smartphone ou l’ampoule LED (par rapport aux technologies de plus grande taille comme la voiture électrique ou les centrales électriques), ont révélé des avantages systématiques en termes de vitesse de déploiement, de réduction des coûts et d’acceptabilité sociale (Wilson et al., 2020).

Enfin, la vitesse de substitution technologique est fonction du mode selon lequel la nouvelle technologie s’insère facilement dans le contexte technologique, économique et social pour remplacer la technologie existante. A l’inverse, la diffusion a tendance à être plus lente lorsque l’innovation implique des changements profonds dans les technologies connexes, les marchés, les modèles commerciaux, les politiques, les pratiques des utilisateurs et les représentations culturelles (Geels, 2018). Le rythme de substitution technologique serait encore conditionné par des questions de résistance des intérêts dominants et de coordination des politiques (Markard et al., 2020). Les technologies matures entrées en déclin peuvent ainsi résister et retarder leur déclin, à l’instar de ce qui a été argumenté dans le cas de l’énergie nucléaire (Markard et al., 2020).

4. Analyse comparative de substitutions technologiques passées

Pour comprendre les formes et les délais possibles relatifs à la diffusion des technologies de l’hydrogène en substitution des technologies polluantes actuelles, nous établissons une comparaison avec plusieurs transitions entre différentes technologies de production et de consommation d’énergie ayant eu lieu par le passé. Cette méthode d’analyse comparative historique permet de tester l’effet de certains facteurs comme la réduction des coûts ou le

besoin d'infrastructures sur le rythme de transition vers les nouvelles innovations technologiques plus propres, telles que les technologies de l'hydrogène à faible émission de carbone.

4.1 Analyse de la durée de la formation et du déclin des technologies

La substitution technologique comprend le temps de formation et de déclin d'une technologie.. Plus la formation et le déclin sont conséquents, plus la substitution s'étale dans le temps. Nous analysons ici 14 processus de substitution technologique, impliquant 22 technologies nouvelles et anciennes, de différents secteurs de production et de consommation d'énergie. L'Annexe 1 récapitule les processus étudiés, ainsi que les principales sources de données.

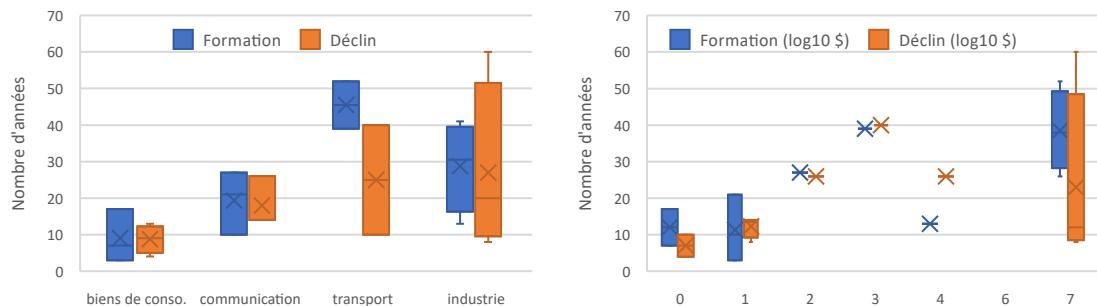
L'Annexe 2 montre les estimations de la durée de formation et de déclin des technologies étudiées. Pour la durée de formation, nous considérons qu'elle démarre au moment de l'invention (l'année reporté dans des listes comme la base CHAT (Comin & Hobjin, 2009) ou bien de parution du premier modèle) et qu'elle s'achève lorsque la technologie nouvelle a atteint 10% de part de marché. Pour le déclin, celui-ci débute lorsque la technologie atteint son maximum de part de marché et s'achève lorsque la technologie sortante connaît le taux de déclin le plus élevé. Ces deux métriques – l'année où la technologie nouvelle a atteint 10% de part de marché pour marquer la fin de la période de formation, et l'année où la technologie sortante a connu le taux de déclin le plus élevé pour la fin de la période de déclin – ont été sélectionnées parmi les indicateurs analysés qui ont une importance-clé dans la formation et le déclin des technologies selon la littérature (voir Bento et al., 2018 ; Gros et al., 2018 ; IEA, 2020). En particulier, ces deux indicateurs se sont avérés supérieurs en termes de disponibilité de données et de présentation d'estimations plus stables.

La durée de formation et de déclin technologique est généralement longue et se compte en décennies plutôt qu'en années. Ainsi, les données montrent que les processus de transition technologique analysés ont pris en moyenne entre deux et trois décennies, avec une grande variabilité. En particulier, en excluant la transition du bois pour le charbon, exceptionnellement longue, le temps de formation des technologies nouvelles a été en

moyenne de 23 années (17 années d'écart-type⁵) et le déclin des technologies anciennes de 20 années (16).

La caractéristique des technologies a un effet sur la durée des substitutions technologiques. Le Graphique 1 récapitule la durée de la formation et du déclin des technologies analysées dans l'échantillon par type de technologie et par taille unitaire. Cette approche permet de comprendre comment la spécificité sectorielle et la granularité (i.e., l'échelle unitaire) influent sur la durée de substitution. Les technologies associées à des transports ou de l'industrie (secteurs traditionnellement visés par les technologies de l'hydrogène) montrent des dynamiques de formation et de déclin beaucoup plus lentes que celles des biens de consommation. Par ailleurs, la durée de formation et de déclin de technologies plus chères est en moyenne plus élevée et incertaine que celle des technologies qui coûtent jusqu'à quelques dizaines de dollars.

Graphique 1. Durée de la formation et du déclin moyen par type de technologie (à gauche) et par échelle unitaire ou granularité technologique (à droite)



Note : les graphiques ne tiennent pas compte de la transition énergétique du bois au charbon à cause d'une période de formation (145 ans) et de déclin (131 ans) exceptionnellement longue. À gauche, le diagramme en forme de boîte à moustache présente de manière simple et concise la dispersion des données, ainsi que la médiane (représentée par une trace), la moyenne (marquée par une étoile) et la répartition (les 25^e et 75^e percentiles marquent respectivement le bas et le haut du rectangle). À droite, l'axe horizontal (des X) se réfère à l'échelle de prix de chaque technologie, laquelle est une mesure habituelle de granularité technologique (axe logarithmé log10 de dollars américains de 2022).

⁵ L'écart-type est une mesure couramment utilisée pour évaluer la dispersion des valeurs par rapport à la moyenne d'un ensemble de données.

4.2 Facteurs influençant la substitution technologique : Relations entre coûts, infrastructures et adoption

Nous allons maintenant nous intéresser aux principaux facteurs de formation et de déclin technologique. Pendant la période de substitution technologique, les obstacles à l'adoption de la nouvelle technologie tendent à diminuer. Le coût des nouvelles technologies baisse avec le déploiement par les effets d'apprentissage et d'échelle, alors que la couverture des infrastructures s'élargit. Tout cela rend la technologie plus accessible et pratique. Dans le même temps, la technologie existante peut présenter des problèmes et des dysfonctionnements grandissants. Par exemple, à l'issue des accidents survenus dans les centrales nucléaires, comme celui de Fukushima, la perception de problèmes de sécurité et la résistance sociale ont amené plusieurs pays à sortir de l'énergie nucléaire (Markard et al., 2020).

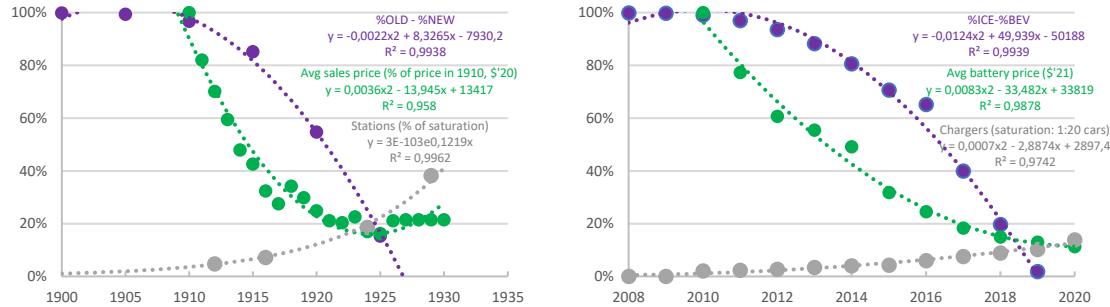
Le Graphique 2 compare l'évolution des coûts et du déploiement des infrastructures avec la substitution technologique. Cela permet de comprendre de quelle manière ces deux variables évoluent, interagissent et influencent le rythme de substitution technologique. Pour cela, nous analysons le processus de substitution des voitures thermiques par des voitures électriques à batterie en Norvège (Graphique 2, à droite), qui est un exemple de transition en cours (plutôt rapide) vers une économie plus sobre en carbone.⁶

La dynamique de substitution technologique s'accélère après les importantes réductions de coût. En effet, l'écart entre la part de marché de la voiture thermique et celle de la voiture électrique est passé de 75 % à 40 % dans les deux années suivant une baisse prononcée des coûts en 2015. La moyenne pondérée de ces coûts en fonction des volumes des batteries est passé de 607 \$/kWh à 393 \$/kWh grâce à la réduction des coûts dans la production des « pack » de batteries et surtout des cellules (BloombergNEF, 2022). Nous comparons cette dynamique de substitution avec la transition des chevaux vers les automobiles aux Etats-Unis, au début du XXème siècle (Graphique 2, à gauche). De même, l'écart entre les parts de marché se rétrécit rapidement de 85 % à 50 % entre 1915 et 1920 à la suite d'une réduction importante du coût des automobiles, qui coûtaient en 1917 le quart du prix du début de cette période. Cette baisse des coûts a été possible grâce à la mise en place d'un système moderne basé sur les principes scientifiques

⁶ La légende du graphique explique tous les détails sur les analyses et les sources de données.

d'organisation (taylorisme) et de production de masse (fordisme), qui ont permis un meilleur apprentissage et une meilleure introduction des améliorations (Grubler, 2003).

Graphique 2. Relation entre substitution technologique, coûts et infrastructures au cours du temps (en pourcentage d'écart de parts de marché pour les technologies ; en pourcentage de réduction des coûts de la nouvelle technologie par rapport au niveau maximal historique et en pourcentage de la couverture maximale (réelle ou projeté) d'infrastructures).



À droite, le graphique montre la substitution des voitures thermiques par des voitures électriques en Norvège. Les équations (et les courbes) correspondent aux meilleurs ajustements des points qui représentent les données réelles. En violet sont représentées les données réelles et modélisées de la différence entre les parts de marché de l'ancienne et de la nouvelle technologie dans les nouveaux enregistrements (IEA, 2023). En 2014, par exemple, les voitures électriques représentaient déjà 20 % des nouvelles immatriculations en Norvège. En vert, les données correspondent à l'évolution des coûts de la technologie, approchés par le prix moyen des batteries qui est une composante-clé des nouvelles immatriculations (BloombergNEF, 2022). En 2014, par exemple, le prix des batteries avait déjà chuté à 50 % par rapport à celui de 2010. Enfin, en gris, les données de l'évolution des infrastructures, en particulier le nombre de bornes de recharge en Norvège par rapport au niveau de saturation estimé en considérant une borne de recharge par vingtaine de voitures électriques immatriculées (IEA, 2023). En 2014, par exemple, la densité des bornes de recharge électrique avait déjà atteint 4 % du niveau de saturation, calculé sur la base d'une borne pour 20 voitures. La substitution des voitures thermiques par des voitures électriques est comparée à la dynamique de remplacement des chevaux par les voitures aux Etats-Unis dans la première moitié du XXème siècle (graphique de gauche). En violet, les parts de marché (de chevaux par rapport à l'automobile) sont calculées à partir de Grubler (2003 : 63). En vert, les données représentent le prix moyen de vente des voitures aux États-Unis (Abernathy & Wayne, 1974 : 114) et, en gris, ils correspondent au nombre de stations-service aux États-Unis par rapport à son niveau maximal historique (Melaina, 2005 : 40).

Dans les deux cas, la réduction de coûts est évidente et intervient clairement avant le déploiement des infrastructures. Nous observons en effet une réduction importante des coûts de la nouvelle technologie avant l'accélération de la substitution technologique. En revanche, le déploiement des infrastructures de soutien – bornes de recharge pour la voiture électrique ou bien stations-service pour l'automobile dans le passé – a tendance à

se généraliser plus tard, lorsque le processus de substitution est bien avancé et que la nouvelle technologie est proche de dominer le marché.

5. Discussion des hypothèses marquantes de l'économie de l'hydrogène à la lumière des enseignements théoriques et empiriques

5.1 Diagnostic des hypothèses communément partagées

Nos analyses des transitions technologiques dans l'histoire contemporaine ainsi que les conclusions de la littérature du changement technologique, en particulier d'inspiration évolutionniste (Freeman, 2019 ; Geels, 2018 ; Grubler, 2003) - qui rend compte de longs délais de diffusion et de substitution technologique dans l'histoire - remettent en question les hypothèses fréquemment utilisées dans les études sur la transition vers une économie de l'hydrogène. Ces dernières montrent en effet des résultats généralement trop optimistes concernant la diffusion des technologies de l'hydrogène. Plus précisément, nous nous proposons de confronter les leçons de l'analyse théorique et empirique à chacune des hypothèses généralement avancées dans les études sur l'hydrogène :

- Les nouveaux systèmes ne remplacent pas rapidement les anciens, à l'inverse de ce qui est souvent implicite dans les études sur le développement de l'hydrogène (e.g., Rifkin, 2007). Nous observons que l'émergence de nouvelles technologies et le déclin des technologies existantes, qui caractérisent la substitution technologique, s'étalent normalement sur plus de deux ou trois décennies. Cela peut varier selon le type de technologie et la taille du système, mais le trait commun à la vingtaine de processus de substitution analysés est la tendance à l'inertie et à la lenteur des changements, qui prennent rarement moins d'une décennie ;
- Les applications mobiles ne présentent pas les exemples de transition les plus rapides, même si elles ont un grand potentiel de décarbonation (e.g. Shell, 2001, 2017). La substitution technologique dans les transports est particulièrement longue en raison des changements nécessaires dans les structures sociales (mise en place d'infrastructures, changement d'habitudes, dans l'urbanisme, etc.) (Geels, 2018). Cela explique aussi que le temps de formation des nouvelles

- innovations technologiques dans les transports est souvent supérieur à trois décennies. Rappelons que la première voiture électrique moderne produite en série, la GM EV1, apparaît aux États-Unis en 1996, il y a plus de deux décennies ;
- Les grands projets centralisés ne permettent pas une diffusion plus rapide et à moindre coût, comme cela a été préconisé dans certains études pour l'hydrogène (e.g. Alverà, 2021 ; Shell, 2017). Nous observons que la durée de formation et de déclin de technologies a tendance à augmenter avec la taille des technologies (la complexité technologique et les besoins en infrastructures contribuent aussi à ralentir la substitution technologique). En revanche, le nombre d'années de formation et de déclin technologique tend à diminuer pour les technologies de plus petite taille ;
 - Le développement des infrastructures ne précèdent pas les baisses de prix et le développement de la demande, comme affirmé tant de fois (e.g. IEA, 2019). Clairement, les nouvelles technologies comme l'hydrogène nécessitent une infrastructure de distribution pour pouvoir démarrer, par exemple dans les transports (Sperling & Ogden, 2006). Cependant, des études récentes montrent que le nombre optimal de stations a été souvent surestimé et que les conducteurs ont seulement besoin d'une station située sur leurs routes habituelles plutôt que près de leur domicile (Kelley et al., 2022). Concernant la transition vers l'automobile au XXème siècle et vers la voiture électrique actuellement, nous observons que le déploiement général des infrastructures de soutien, comme les stations-service ou les bornes de recharge, ne s'accélère que plus tard, quand la nouvelle technologie est déjà dominante ou sur le point de le devenir, ce qui intervient après la réduction significative des coûts de la nouvelle technologie. Tout cela relativise le rôle de l'infrastructure de soutien, notamment par rapport à d'autres facteurs comme le coût et la performance, pendant la période de transition technologique.

Ce dernier résultat, en particulier, questionne l'idée selon laquelle la mise en place des infrastructures (canaux, rails, routes, aéroports) précèdent l'adoption des véhicules (trains, automobiles, avions), lesquelles anticipent la croissance des déplacements (Leibowicz, 2018). Cependant, les analyses effectuées jusqu'ici ont eu tendance à confondre différentes situations sous le chapeau générique d' « infrastructures ». Il

semble ainsi nécessaire de distinguer les différents types d'infrastructures. Les infrastructures de soutien comme les stations-service (essence, hydrogène, etc.) et les bornes de recharge procurent surtout de la commodité à l'usager. Celles-ci produisent surtout des externalités positives d'envergure par une plus grande mise à disposition pour les usagers des biens compatibles ou auxiliaires de la technologie adoptée. Elles sont habituellement confondues avec les infrastructures constituées par des supports physiques essentiels comme les réseaux électriques ou de gaz naturel (Economides, 1996). Ces infrastructures essentielles ont un cycle de vie plus long, engagent des coûts fixes irrécupérables (*sunk costs*) difficilement redéployables et dont la coordination des investissements et l'expansion nécessitent plus de soutien public (Curien, 2005 ; Bento, 2010). Opérer cette distinction semble nécessaire dans le cadre de futures études, en particulier pour déterminer le phasage des investissements, le type d'investissements et le mode de coordination (marché vs État) en vue de la mise en place des infrastructures.

5.2 Leçons pour éviter la répétition des mêmes erreurs

La littérature académique du changement technologique et quelques expériences réussies dans le domaine de l'hydrogène (H_2) et des piles à combustible (PAC) permettent de formuler une série de recommandations afin d'éviter de répéter un nouveau faux-départ. L'objectif est de rendre ces technologies concurrentielles pour satisfaire la demande potentielle qui valorise le plus les attributs de l' H_2 et des PAC à travers des stratégies permettant de tirer au mieux parti des économies d'échelle et d'apprentissage. Nous en retirons quatre stratégies en particulier :

- Cibler les premiers marchés de niche. Dans le passé, les premiers moteurs à vapeur ont trouvé un marché de niche dans le pompage d'eau des mines pour sauver les mineurs de la noyade ; pour cela les propriétaires des mines étaient prêts à payer jusqu'à 25 000 \$/2022 par kWh (Grubler, 2003). Ce marché de niche a donné l'opportunité de commencer à produire les machines à vapeur, ce qui a été à la base de la réduction des coûts et de l'amélioration des performances par l'effet d'apprentissage. En 2020, et malgré leur prix, les piles à combustible équipaient déjà 25 000 chariots éléveurs dans le monde (Bento, 2020). Les prochains marchés porteurs peuvent se trouver dans plusieurs applications comme les engins de chantier, les bus, les camions ou les trains, surtout lorsque les technologies

concurrentes (notamment les batteries) connaissent des difficultés pour remplacer les moteurs à combustion (IEA, 2019) ;

- Diversifier les demandes pour élargir le marché. Dans le passé, les machines à vapeur ont trouvé de nouvelles applications (stationnaires et puis mobiles) au fur à mesure qu'elles étaient moins chères et plus performantes. De même, la mise en place du procédé Bessemer a permis une production d'acier plus efficace, induisant une expansion de la demande (Poznanski, 1986). Plus récemment, les téléphones mobiles ont diversifié les services (téléphonie, sms, web, etc.), ce qui a joué un rôle essentiel dans leur succès (Bento, 2016). Tous ces exemples montrent l'importance de diversifier les marchés pour continuer à réduire les coûts par l'effet d'apprentissage et d'envergure/gamme. Ainsi, les expérimentations pré-commerciales en cours peuvent réduire les coûts des technologies de l'hydrogène, en les rendant compétitives dans davantage de secteurs, comme le stockage d'énergie (intermittente d'origine renouvelable) ou l'industrie (chimie, sidérurgie, etc.). Notons ici la stratégie de Toyota qui produit son propre système de PAC et l'utilise dans différentes classes de véhicules (voiture individuelle, bus, etc.) pour réduire les coûts ;
- Commencer par produire de petites unités en grandes quantités. Les technologies plus granulaires permettent d'expérimenter un nombre plus élevé d'unités et ainsi de réaliser plus vite des économies d'échelle et d'apprentissage (Wilson et al., 2020). La stratégie danoise de produire des turbines éoliennes de plus petite taille et puis de monter graduellement en puissance s'est avérée plus réussie que l'approche d'autres pays comme les États-Unis de mise à l'échelle très vite dès le départ (Garud & Karnøe, 2003). Plus récemment, la technologie solaire photovoltaïque a connu une baisse spectaculaire de coûts de l'ordre de 80 % en 10 ans, rendue possible notamment par le déploiement précoce dans les petites applications des produits électroniques ou stationnaires pour la production d'énergie dans le secteur résidentiel (Nemet, 2019). Dans le cas des PAC, le programme ENE-FARM au Japon a déployé environ 300 000 petites unités de micro-cogénérateurs (micro CHP) de puissance souvent inférieure à 1 kW en 10 ans, en divisant par quatre le prix initial (IEA, 2019) ;
- Prioriser les réductions de coûts technologiques par la R&D ou déploiement plutôt que les infrastructures. Le prix des ampoules LED a considérablement baissé avec la montée de l'investissement en R&D (ce qui a aussi amélioré substantiellement

leur qualité) et le déploiement en masse qui a suivi (Stegmaier et al., 2021). Par ailleurs, le marché des voitures électriques en Norvège s'est accéléré avec l'arrivée des nouvelles voitures électriques à coûts plus abordables et disposant d'une large autonomie dans les années 2010, ce qui a précédé l'accélération du développement du réseau de bornes de recharge dans ce pays. Dans le cas de la transition vers l'automobile aux Etats-Unis, le prix des voitures a également beaucoup baissé avant la croissance des stations-service. Ainsi, les technologies de l'hydrogène auront à gagner si elles continuent d'investir en R&D pour l'amélioration des innovations. De plus, pour les applications mobiles, un nombre de stations moins important que celui souvent estimé serait suffisant pour lancer un réseau initial pour l'hydrogène (Kelley et al., 2022).

Dans l'avenir, l'hydrogène pourra être utilisé dans de nouvelles applications à découvrir, en jouant les économies d'envergure pour réduire les coûts avec des retombées pour la lutte contre le changement climatique. Par exemple, de nouveaux marchés peuvent se développer au croisement des tendances socio-technologiques fortes telles que la digitalisation ou l'économie du partage (e.g., dans la mobilité partagée), afin d'atteindre des réductions importantes de la demande énergétique (et par ce biais des émissions) dans les transports. D'où l'intérêt d'expérimenter plusieurs solutions, en l'absence de marchés captifs pour l'H₂ et les PAC, surtout lorsque les marchés principaux pour l'hydrogène ne sont pas encore établis.

6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons cherché à rendre compte des trajectoires et des facteurs ayant marqué plusieurs transitions technologiques au cours de l'histoire contemporaine. Ce faisant, nous avons dévoilé les meilleures stratégies à adopter pour accélérer la préparation et la diffusion des énergies renouvelables en substitution des énergies fossiles, dont le déclin et la substitution sont essentiels pour la décarbonation, sachant que celle-ci doit s'accélérer pour limiter la hausse des températures moyennes de la planète à 1,5°C par rapport aux niveaux de l'ère préindustrielle (IEA, 2022). En particulier, nous avons

examiné le cas de la transition vers les technologies de l'hydrogène, dont l'intérêt a resurgi récemment en raison de son potentiel dans les secteurs difficiles à décarboner, comme les transports de longue distance et l'industrie. Mais la promesse de développement d'une véritable économie de l'hydrogène n'est pas nouvelle. Plusieurs tentatives ont déjà eu lieu, notamment dans l'histoire récente, sans succès. Il est donc apparu nécessaire de comprendre les raisons de ces faux-départs, afin de ne pas les répéter. Par ailleurs, nous avons tenté de tirer les leçons d'exemples de substitutions technologiques réussies.

Nous avons développé une nouvelle méthodologie pour l'étude de la transition socio-technologique qui peut être appliquée à l'étude de l'émergence de nouveaux systèmes technologiques comme l'économie de l'hydrogène. Nous n'avons considéré ici que deux exemples de substitution technologique dans l'automobile pour discuter des déterminants principaux de la durée de changement. Mais même avec un nombre de cas aussi limité, les résultats obtenus remettent déjà en question des suppositions couramment formulées dans les études sur les technologies de l'hydrogène. Cependant, l'analyse d'autres processus de transition, en particulier dans d'autres secteurs d'activité, permettrait d'accroître la compréhension des trajectoires de substitution. En raison de la circulation actuelle d'un grand nombre de mythes et d'idées reçues non validées par les études théoriques et empiriques, il apparaît notamment important d'approfondir la connaissance du rôle que les infrastructures et (surtout) les coûts jouent sur le rythme de transition vers des innovations technologiques plus soutenables.

Remerciements

L'auteur remercie Nicolas Simoncini et Nathalie Kroichvili pour leurs commentaires tout au long des différentes versions de ce chapitre. Les résultats présentés dans cet article sont issus des analyses effectuées dans le cadre d'une recherche qui a bénéficié du financement de la Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) de Portugal à travers le projet Sus2Trans (PTDC/GES-AMB/0934/2020). L'auteur assume l'entièvre responsabilité des erreurs éventuelles de ce chapitre.

Bibliographie

- Alverà, M. (2021). The Hydrogen Revolution: a blueprint for the future of clean energy. Hachette UK.
- Arthur, W. B. (2009). The nature of technology: What it is and how it evolves. Simon and Schuster.
- Bento, N. (2008). Building and interconnecting hydrogen networks: Insights from the electricity and gas experience in Europe. Energy Policy, 36(8), 3019-3028.
- Bento, N. (2010). La transition vers une économie de l'hydrogène: infrastructures et changement technique (Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Grenoble II).
- Bento, N. (2016). Calling for change? Innovation, diffusion, and the energy impacts of global mobile telephony. Energy Research & Social Science, 21, 84-100.
- Bento, N. (2020). L'économie de l'hydrogène est-elle définitivement enterrée?: dix ans après. L'économie de l'hydrogène est-elle définitivement enterrée?: dix ans après, (649 (mars-avril)), 73-79.
- Bento, N., Wilson, C., & Anadon, L. D. (2018). Time to get ready: Conceptualizing the temporal and spatial dynamics of formative phases for energy technologies. Energy Policy, 119, 282-293.
- BloombergNEF (2022). Battery Pack Prices Fall to an Average of \$132/kWh, But Rising Commodity Prices Start to Bite. [November 30](https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/). <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/> (dernier accès 10/10/2022).
- Bockris, J.O. (1977). The Hydrogen Economy. In: Bockris, J.O. (eds) Environmental Chemistry. Springer, [Boston, MA](#). https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6921-3_17
- Coccia M. (2019). Theories of the evolution of technology based on processes of competitive substitution and multi-mode interaction between technologies. Journal of Economics Bibliography 6(2): 99-109.
- Comin, D. A., & Hobijn, B. (2009). The CHAT dataset (No. w15319). National Bureau of Economic Research.
- Curien N. (2005). Les Economies des Réseaux. Editions La Découverte, col . « Repères » : n° 293, Paris.
- Dunn, S. (2002). Hydrogen futures: toward a sustainable energy system. International journal of hydrogen energy, 27(3), 235-264.
- Eames, M., & McDowall, W. (2005). UKSHEC hydrogen visions. UKSHEC Social Science Working Paper.
- Economides N. (1996). The Economics of Networks. International Journal of Industrial Organization 14: 673-699.

European Commission (2014). Directive 2014/94/EU of the European parliament and of the council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure.

Fisher, J. C., & Pry, R. H. (1971). A simple substitution model of technological change. *Technological Forecasting and Social Change*, 3, 75-88.

Fisher, J.C. (1974). Energy Crises in Perspective. John Wiley & Sons, New York, NY.

Frantzeskaki, N., & Loorbach, D. (2010). Towards governing infrasystem transitions: reinforcing lock-in or facilitating change?. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(8), 1292-1301.

Freeman, C. (2019). History, co-evolution and economic growth. *Industrial and Corporate Change*, 28(1), 1-44.

Fressoz J.-B. (2022). La “ transition énergétique ”, de l’utopie atomique au déni climatique, USA, 1945-1980. *Revue d’Histoire Moderne et Contemporaine*. hal-03716635.

Garud, R., & Karnøe, P. (2003). Bricolage versus breakthrough: distributed and embedded agency in technology entrepreneurship. *Research policy*, 32(2), 277-300.

GEA (2012). Global Energy Assessment. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Geels, F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. *Research policy*, 31(8-9), 1257-1274.

Geels, F. W. (2018). Disruption and low-carbon system transformation: Progress and new challenges in socio-technical transitions research and the Multi-Level Perspective. *Energy Research & Social Science*, 37, 224-231.

Gross, R., Hanna, R., Gambhir, A., Heptonstall, P., & Speirs, J. (2018). How long does innovation and commercialisation in the energy sectors take? Historical case studies of the timescale from invention to widespread commercialisation in energy supply and end use technology. *Energy Policy*, 123, 682-699.

Grubler, A. (2012). Energy transitions research: Insights and cautionary tales. *Energy Policy*, 50, 8-16.

Grubler, A. (2003). Technology and Global Change. Cambridge University Press, Cambridge.

Grubler, A., & Wilson, C. (Eds.). (2014). Energy Technology Innovation: Learning from Historical Successes and Failures. Cambridge University Press.

Hu, H., & Green, R. (2011). Making markets for hydrogen vehicles: Lessons from LPG. *International journal of hydrogen energy*, 36(11), 6399-6406.

IEA (2019). The Future of Hydrogen. [IEA, Paris](https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen) <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (dernier accès 25/10/2022).

IEA (2020). Energy Technology Perspectives 2020. [IEA, Paris](https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020) <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020> (dernier accès 20/4/2021).

IEA (2022). Global Hydrogen Review 2022. IEA, Paris
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf> (dernier accès 14/10/2022).

IEA (2023). Global EV Data Explorer. IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer> (dernier accès 10/6/2023).

IPCC (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp.

Kelley, S., Gulati, S., Hiatt, J., & Kuby, M. (2022). Do early adopters pass on convenience? Access to and intention to use geographically convenient hydrogen stations in California. International Journal of Hydrogen Energy, 47(4), 2708-2722.

Leibowicz, B. D. (2018). Policy recommendations for a transition to sustainable mobility based on historical diffusion dynamics of transport systems. Energy Policy, 119, 357-366.

Lewis, J. I., & Nemet, G. F. (2021). Assessing learning in low carbon technologies: Toward a more comprehensive approach. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 12(5), e730.

Lovins, A. B. (2018). How big is the energy efficiency resource?. Environmental Research Letters, 13(9), 090401.

Lovins, A. B., Lovins, L. H., & Hawken, P. (1999). A road map for natural capitalism. Harvard Business Review, 77, 145-161.

Markard, J., Bento, N., Kittner, N., & Nunez-Jimenez, A. (2020). Destined for decline? Examining nuclear energy from a technological innovation systems perspective. Energy Research & Social Science, 67, 101512.

Melaina, M. W. (2005). Initiating hydrogen infrastructures: analysis of technology dynamics during the introduction of hydrogen fuel for passenger vehicles. PhD dissertation. University of Michigan.

Mitchell, B. R. (2003). International Historical Statistics: 1750-2000. The Americas. Palgrave Macmillan.

Nakicenovic, N. (1984). Growth to Limits: Long Waves and the Dynamics of Technology. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

NEMA (2017). First Quarter 2017 Year-Over-Year LED A-Line Lamp Shipments Up, Halogen, Incandescent and CFL Shipments Decline, press release published online June 23, 2017.

Nemet, G. F. (2019). How solar energy became cheap: A model for low-carbon innovation. Routledge.

Paquier S., Williot J-P. (2005), (sous la direction de) L'Industrie du Gaz en Europe aux XIXe et XXe Siècles: L'innovation Entre Marchés Privés et Collectivités Publiques, PIE Peter Lang, Bruxelles.

Pistorius, C. W., & Utterback, J. M. (1997). Multi-mode interaction among technologies. *Research Policy*, 26(1), 67-84.

Plotkin S. (2007), "Examining Hydrogen Transitions," Energy Systems Division, Argonne National Laboratory for the U.S. Department of Energy, ANL-07/09, February.

Poznanski, K. Z. (1986). The extinguishing process: A case study of steel technologies in the world industry. *Technovation*, 4(4), 297-316.

Rifkin J. (2007). Leading the way to the hydrogen economy and a Third Industrial Revolution: a New Energy Agenda for the European Union in the 21st Century. Présenté au Parlement UE en hiver 2007.

Rogers E.M. (2003). Diffusion of Innovations. 5th Edition. Free Press. New York.

Rosenbloom, D., & Rinscheid, A. (2020). Deliberate decline: an emerging frontier for the study and practice of decarbonization. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 11(6), e669.

Sandén, B. A., & Hillman, K. M. (2011). A framework for analysis of multi-mode interaction among technologies with examples from the history of alternative transport fuels in Sweden. *Research Policy*, 40(3), 403-414.

Shell (2001), "Energy needs, choices and possibilities : scenarios to 2050", Global Business Environment, Shell International.

Shell (2017). Energy of the Future? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H2. Shell and the Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy. <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/6786> (dernier accès 25/10/2022).

Simoncini, N. (2019). Le développement des recherches sur les piles à combustible en France à la fin des années cinquante: analyse de la construction historique d'un engouement technologique. *Technologie et Innovation*, 4(4).

Sovacool, B. K. (2016). How long will it take? Conceptualizing the temporal dynamics of energy transitions. *Energy Research & Social Science*, 13, 202-215.

Sperling, D., & Ogden J. (2006). The Bumpy Road to Hydrogen. *Proceedings of the World Hydrogen Energy Conference*, June 26, Lyon.

Staffell, I., Scamman, D., Abad, A. V., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., ... & Ward, K. R. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 12(2), 463-491.

Stegmaier, P., Visser, V. R., & Kuhlmann, S. (2021). The incandescent light bulb phase-out: exploring patterns of framing the governance of discontinuing a socio-technical regime. *Energy, Sustainability and Society*, 11(1), 1-22.

Suurs A.A., Hekkert M.P., Smits R.E.H.M. (2009), « Understanding the build-up of a technological innovation systems around Hydrogen and Fuel Cell Technologies », University of Utrecht, ISU Working Paper n°09.10.

Trencher, G., & Wesselink, J. (2022). Roadblocks to fuel-cell electric vehicle diffusion: Evidence from Germany, Japan and California. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 112, 103458.

Utterback, J. M., Pistorius, C., & Yilmaz, E. (2019). The Dynamics of Competition and of the Diffusion of Innovations. MIT Sloan School Working Paper 5519-18.

Wilson, C. (2012). Up-scaling, formative phases, and learning in the historical diffusion of energy technologies. *Energy Policy*, 50, 81-94.

Wilson, C., Grubler, A., Bento, N., Healey, S., De Stercke, S., & Zimm, C. (2020). Granular technologies to accelerate decarbonization. *Science*, 368(6486), 36-39.

World Bank (2007). *World Development Indicators*. Washington, D.C.

Annexe 1. Technologies, données et sources.

Type	Remplacé	Émergent	Pays	Période	Indicateur	Source principale
biens de consommation	cassette	vinyle	ÉUA	1973-2003	recettes par media (million (courant) US\$)	Grubler, 2003; RIAA
biens de consommation	VHS	dvd	ÉUA	2000-2019	part en recettes	Markard, 2020 ; Digital Entertainment Group, 2022
biens de consommation	DVD	streaming	ÉUA	1999-2019	part en recettes	Markard, 2020 ; Digital Entertainment Group
biens de consommation	lampes incandescentes	LED	ÉUA	2011-2017	part en ventes	NEMA, 2017
communication	télégraphe	téléphone	ÉUA	1876-2003	#télégrammes; #lignes	CHAT database (Comin & Hobijn, 2009); Mitchell, 2003
communication	téléphone	internet	ÉUA	1903-2018	#lignes; #usagers	CHAT database ; Mitchell, 2003 ; World Bank, 2007
communication	téléphone	téléphone portable	ÉUA	1903-2019	#lignes; #usagers	Comin & Hobijn (2004) ; OurWorldinData
transport	bateau à voile	bateau à vapeur	ÉUA	1790-1970	tonnage brut (1000 tonnes)	Nakinecovic, 1984
transport	chevaux	voitures	ÉUA	1850-2008	#animaux; immatriculations	Fisher, 1974
industrie	acier_creuset	acier_bessemer	ÉUA	1860-1930	10^6 tonnes	Nakinecovic, 1984 ; US Stat. Abstract
Industrie	acier_bessemer	acier_openhearth (Martin-Siemens)	ÉUA	1868-1966	10^6 tonnes	Nakinecovic, 1984 ; US Stat. Abstract
Industrie	acier_openhearth	acier_oxygène	ÉUA	1868-1986	10^6 tonnes	Nakinecovic, 1984 ; US Stat. Abstract
Industrie	acier_oxygène	acier_arcelectrique	ÉUA	1909-1986	10^6 tonnes	Nakinecovic, 1984 ; US Stat. Abstract
énergie	bois	charbon	Monde	1800-1995	part en énergie primaire (Mtoe)	GEA, 2012

Annexe 2. Substitution technologique mesurée par la comparaison entre la duration de la formation et du déclin des technologies. Temps de formation moyen de 32 années (37 années d'écart-type) et de déclin moyen de 28 années (34 années d'écart-type). (*) Classé par temps passé entre invention et jalon 10% de part de marché (*timeline, T*) T10%. (**) la plus élevée des taux de croissance annuels (moyenne mobile sur 3 ans).

Type	Remplacé	Émergent	Formation de l'émergent			Déclin du remplaçé			
			Invention	T10%	Invention à T10%*	Max	T50%	Déclin le plus rapide**	Max à plus rapide
biens de consommation	cassette	vinyle	1948	-	-	1977	1986	1990	13
biens de consommation	vhs	dvd	1997	2000	3	1999	2004	2007	8
biens de consommation	lampes incandescentes	LED	2009	2016	7	2011	2015	2015	4
communication	téléphone	internet	1983	1993	10	2001	2017	2015	14
industrie	acier_openhearth	acier_oxygène	1950	1963	13	1955	1970	1981	26
biens de consommation	dvd	streaming	1992	2009	17	2008	2016	2018	10
communication	téléphone	téléphone portable	1973	1994	21	2001	2017	2015	14
industrie	acier_creuset	steel_bessemer	1855	1881	26	1906	1919	1920	14
communication	télégraph	téléphone	1876	1903	27	1945	1964	1971	26
industrie	acier_oxygène	acier_arcelectriq.	1907	1942	35	1973	1982	1981	8
transport	chevaux	automobiles	1885	1924	39	1915	1940	1955	40
industrie	acier_bessemer	acier_openhearth	1865	1906	41	1906	1921	1966	60
transport	bateau à voile	bateau à vapeur	1788	1840	52	1860	1895	1870	10
énergie	bois	charbon	1712	1825	113	1800	1906	1931	131