

L'automobile

Comprendre une logique pour la dépasser



Noosophie IA

sous la direction de Hieronymus Anonymus

Éditions Noosophie

L'automobile

Comprendre une logique pour la dépasser

Noosophie IA

sous la direction de Hieronymus Anonymus

Éditions Noosophie

Informations éditoriales

Titre : L'automobile

Sous-titre : Comprendre une logique pour la dépasser

Auteur : Noosophie IA

Direction : Hieronymus Anonymus

Éditeur : Éditions Noosophie

Entité éditrice actuelle : Association Noosophie

Localisation publique : Roumagne, Lot-et-Garonne, France

Site : noosophie.fr

Édition : Première édition

Date de publication : Septembre 2026

Format : DOCX maître / PDF / EPUB

ISBN : non attribué

Dépôt légal : septembre 2026

Prix : Gratuit

Licence : CC BY-NC-ND 4.0

Titulaire des droits / concédant : Hieronymus Anonymus (pseudonyme public ; identité civile non publiée)

© Hieronymus Anonymus

Contact : contact@noosophie.fr

Cette édition est mise à disposition sous licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0). Elle peut être copiée et partagée sous sa forme inchangée, avec attribution, à des fins non commerciales. La diffusion d'une traduction, adaptation, version modifiée ou œuvre dérivée nécessite une autorisation préalable. Pour toute demande : contact@noosophie.fr.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Note sur la génération et la responsabilité éditoriale

Ce livre a été élaboré dans le cadre d'une collaboration entre Hieronymus Anonymus et Noosophe IA. Hieronymus Anonymus a initié le projet, fixé son objet et ses finalités, arbitré les orientations, relu, corrigé et validé le manuscrit final. Noosophe IA a contribué à la recherche documentaire, à la structuration, à la rédaction, à la comparaison des arguments, aux audits de cohérence et à l'édition. Le texte n'est donc ni une sortie brute d'un modèle ni un texte humain simplement corrigé par une IA : il résulte d'un processus itératif de génération, de critique, de vérification et de validation humaine. Les décisions de finalité, de validation et de publication demeurent humaines.

Sommaire

Chapitre 1 — DE LA MACHINE AU SYSTÈME INDUSTRIEL.....	5
Chapitre 2 — CONCEVOIR POUR FABRIQUER, UTILISER ET MAINTENIR.....	21
Chapitre 3 — L'ÉCONOMIE DU RENOUVELLEMENT ET DU MAINTIEN.....	43
Chapitre 4 — POURQUOI CETTE ÉNERGIE-LÀ ?.....	60
Chapitre 5 — OÙ VA L'ÉNERGIE QUAND ON CONDUIT ?.....	81
Chapitre 6 — D'OÙ VIENT LA MATIÈRE, OÙ VA-T-ELLE ?.....	96
Chapitre 7 — LA VOITURE FABRIQUE SON TERRITOIRE.....	114
Chapitre 8 — LE TRAVAIL QUE L'AUTOMOBILE ORGANISE....	128
Chapitre 9 — ÉLECTRIFIER LA VOITURE OU TRANSFORMER LE SYSTÈME ?.....	143
Chapitre 10 — QUE SERAIT UNE AUTOMOBILE SOBRE ?.....	162

CHAPITRE 1 — DE LA MACHINE AU SYSTÈME INDUSTRIEL

OUVERTURE — LA VOITURE QU'ON NE POUVAIT PLUS FABRIQUER COMME AVANT

Au début du XXe siècle, l'automobile existe déjà. Le problème n'est donc plus de savoir si l'on peut construire une voiture. On le peut. Le problème est de savoir si l'on peut en construire assez vite, assez régulièrement et assez peu cher pour qu'elle cesse d'être un objet exceptionnel. Cette différence paraît modeste. Elle transforme pourtant tout.

Une invention peut rester une curiosité technique pendant des décennies si sa fabrication exige trop de travail qualifié, trop de temps, trop de variations entre deux exemplaires et trop d'argent immobilisé. Pour devenir une industrie de masse, elle doit quitter le monde de la pièce singulière et entrer dans celui de la répétition. Ford n'invente pas l'automobile. Il n'invente pas non plus, à lui seul, les pièces interchangeables, la division du travail ou le convoyeur. Ses ingénieurs combinent des idées déjà présentes dans l'armurerie, l'horlogerie, le vélo, les machines-outils et même les chaînes de désassemblage des abattoirs.[1]

Ce qu'ils produisent à Highland Park est autre chose : un système où chacune de ces idées renforce les autres. Quelques années plus tard, General Motors fera subir une seconde transformation au même objet. Ford avait appris à fabriquer des millions de voitures presque semblables. GM apprendra à fabriquer industriellement la différence elle-même. Entre ces deux révolutions se dessine le cœur du système automobile moderne : produire beaucoup, puis organiser le renouvellement de ce qui a déjà été produit.

1. AVANT LA CHAÎNE : POURQUOI PRODUIRE PEU COÛTE CHER

La fabrication artisanale possède un avantage évident : elle est flexible. Un ouvrier qualifié peut adapter une pièce, reprendre un ajustement, modifier une opération et résoudre un problème localement. Mais cette capacité repose précisément sur ce que la production de masse cherche à supprimer : le temps, la variation et la dépendance à la compétence individuelle. Imaginez cent voitures construites par cent petites équipes.

Chaque équipe doit savoir faire beaucoup de choses. Chaque carrosserie peut demander un ajustement légèrement différent. Les pièces doivent parfois être retouchées. Les ouvriers se déplacent jusqu'au produit, cherchent leurs outils, transportent les composants, attendent qu'une opération précédente soit terminée. Ce système peut produire de très bons objets. Il produit difficilement des millions d'objets identiques à bas prix.

La production de masse inverse donc la logique. Au lieu d'adapter le travail à chaque voiture, on adapte la voiture au système de production. Les pièces doivent être suffisamment interchangeables pour être montées sans reprise. Les opérations doivent être décomposables. L'ordre d'assemblage doit être défini. Les machines doivent être disposées selon le flux du produit. Le temps de chaque poste doit devenir prévisible. L'objet doit devenir compatible avec sa propre répétition. C'est une transformation intellectuelle autant que mécanique. La voiture n'est plus simplement conçue pour rouler. Elle doit aussi être conçue pour être reproduite.

2. FORD : TRANSFORMER LE TEMPS EN PRIX

Les expériences de Ford à Highland Park commencent en 1913. La chaîne n'apparaît pas d'un seul coup. Les ingénieurs testent d'abord le mouvement continu sur des sous-ensembles

comme les magnétos, puis sur les moteurs, les transmissions et enfin les châssis. Les dispositifs rudimentaires où les composants sont glissés ou tirés sont progressivement remplacés par des systèmes entraînés mécaniquement.

Au début de 1914, The Henry Ford estime que les lignes continues permettent de faire passer l'assemblage d'un Model T d'environ douze heures et demie à environ quatre-vingt-treize minutes.[1] Ce chiffre est spectaculaire. Mais le plus important est ce qu'il déclenche ensuite. Le temps économisé devient coût économisé. Le coût économisé permet de réduire le prix.

Le prix réduit augmente le nombre d'acheteurs. L'augmentation de la demande justifie des volumes encore plus grands. Ces volumes rendent rentables de nouveaux investissements dans des machines spécialisées, des flux mieux organisés et des procédés encore plus rapides. The Henry Ford décrit explicitement cette boucle : le gain de temps et de coût permet de baisser le prix, la baisse du prix augmente la demande, et cette demande pousse Ford à rechercher encore davantage d'efficacité.[1]

Le prix du Model T donne l'échelle de la transformation. Ford indique qu'il passe d'environ 825 dollars en 1908 à environ 260 dollars en 1925.[2] Plus de quinze millions d'exemplaires sont finalement produits entre 1908 et 1927. Ce n'est pas seulement une réussite commerciale. C'est un changement de catégorie économique. L'automobile commence à quitter le marché d'un bien réservé à une minorité pour devenir accessible à une partie croissante des ménages. Et plus elle devient accessible, plus la production industrielle qui l'a rendue accessible devient indispensable pour satisfaire le marché qu'elle vient de créer. La chaîne et la demande se mettent à se nourrir mutuellement.

3. LE REVERS DE LA CHAÎNE : ORGANISER LE TRAVAIL POUR ORGANISER LE VOLUME

La chaîne mobile n'économise pas seulement des gestes. Elle redistribue la compétence. Dans un atelier plus artisanal, un travailleur peut participer à de nombreuses opérations. Sur une chaîne, la tâche est décomposée. Une partie du savoir est déplacée de l'ouvrier vers l'organisation du système : ordre des postes, machines, gabarits, cadence, standardisation. Cette évolution augmente la productivité.

Elle peut aussi rendre le travail répétitif, contraint et difficile à soutenir. Ford lui-même rapporte que les ouvriers quittent la chaîne en raison de la monotonie et de la stricte cadence imposée par le mouvement du véhicule.[3] The Henry Ford documente une rotation si importante que l'entreprise aurait dû embaucher environ 53 000 personnes pour maintenir environ 14 000 postes sur une période précédant la politique salariale de 1914.[4] La technologie productive crée donc immédiatement un second problème industriel : comment stabiliser les humains nécessaires à son fonctionnement ? Le fameux Five-Dollar Day de 1914 doit être compris dans cette tension.

Ford augmente fortement la rémunération et réduit aussi la durée des équipes. Il serait excessif de raconter cette décision soit comme un simple geste philanthropique, soit comme une pure manipulation patronale. L'entreprise cherche clairement à stabiliser une main-d'œuvre que la nouvelle organisation du travail fait fuir ; l'opération produit en même temps un immense effet publicitaire et augmente le pouvoir d'achat d'une partie des ouvriers.[3][4] La leçon dépasse Ford.

Une innovation industrielle ne modifie jamais seulement la machine. Elle peut imposer de nouvelles formes de salaire, de discipline, de recrutement, de qualification et d'organisation

sociale. Nous reviendrons sur cette transformation du travail beaucoup plus tard. Ici, il suffit de retenir ceci : la production de masse est déjà un système. La chaîne seule ne suffit pas. Il faut aussi stabiliser les travailleurs, les approvisionnements, les machines et les débouchés.

4. LA STANDARDISATION EST UNE PUISSANCE — JUSQU'AU MOMENT OÙ ELLE DEVIENT UNE RIGIDITÉ

Le Model T démontre la puissance de la stabilité. Pendant près de vingt ans, Ford peut améliorer ses procédés autour d'un véhicule dont l'architecture générale change relativement peu. Les fournisseurs, machines, outillages et ouvriers apprennent à produire un objet connu. Les mêmes composants peuvent être fabriqués à des échelles immenses. C'est exactement le genre de logique qui rend séduisante l'idée d'une automobile maintenue pendant des décennies.

Mais l'histoire du Model T apporte aussi une objection importante à cette intuition. Le monde autour de la voiture change. Les routes s'améliorent. Les acheteurs deviennent plus expérimentés. Ils demandent davantage de puissance, de confort, de vitesse, de couleurs et d'équipements. The Henry Ford souligne rétrospectivement que les qualités mêmes qui avaient fait le succès du Model T — simplicité, robustesse sur mauvaises routes, faible coût — deviennent moins décisives lorsque l'environnement et les attentes évoluent.[5]

Ford tarde à remplacer son produit dominant. Le résultat est instructif. Une architecture stable peut accumuler des économies, des compétences et une immense base de pièces. Elle peut aussi enfermer l'entreprise dans les choix techniques et commerciaux qui ont permis son succès. La standardisation ne doit donc pas être confondue avec l'immobilité. Une voiture durable n'est viable que si ce qui doit évoluer peut évoluer sans

imposer de remplacer tout le système. Ce problème apparaîtra plus tard dans notre réflexion sur la compatibilité temporelle. Il est déjà visible ici, au moment même où la production de masse triomphe.

5. SLOAN : PRODUIRE DE LA VARIÉTÉ SUR UNE BASE INDUSTRIELLE

General Motors répond à Ford d'une manière souvent mal résumée. On raconte parfois l'histoire comme si Ford représentait la standardisation et GM la variété. C'est incomplet. GM conserve l'avantage industriel de la standardisation, mais cherche à le cacher derrière une diversité commerciale beaucoup plus grande. La formule associée à Alfred Sloan — une voiture pour chaque bourse et chaque usage — résume cette stratégie.[6]

Au lieu de chercher à vendre presque le même véhicule au plus grand nombre, GM organise une échelle de marques, de prix et de statuts. Chevrolet peut constituer l'entrée. Au-dessus viennent d'autres divisions. Cadillac représente le sommet. Le client n'est plus seulement invité à entrer dans le marché automobile. Il peut y progresser. Cette organisation a une conséquence profonde : la différence entre deux voitures devient elle-même industrialisée.

Les divisions peuvent partager des composants, des principes techniques et des capacités de production tout en donnant au consommateur l'impression d'un choix nettement différencié. GM souligne d'ailleurs que Sloan encourage le partage de composants entre divisions afin de contenir les coûts.[7] Nous retrouvons alors une distinction qui deviendra centrale dans tout ce livre : standardisation interne n'est pas uniformité visible. Une industrie peut fabriquer beaucoup de diversité apparente sur une base technique largement commune. Cette

idée survivra très longtemps à Sloan. Les plateformes contemporaines en sont l'héritage le plus évident.

6. DONNER UNE DATE COMMERCIALE À UNE MACHINE QUI FONCTIONNE ENCORE

La diversité de gamme ne suffit cependant pas à organiser un marché de renouvellement. Il faut aussi qu'une voiture existante puisse sembler ancienne avant d'être techniquement morte. C'est ici que le changement annuel de modèle prend son importance. Le Smithsonian National Museum of American History attribue à General Motors, dans les années 1920, la création de l'annual model change et l'introduction de la « design obsolescence » comme stratégie commerciale.[8]

Le terme doit être manié avec précision. Il ne signifie pas que la voiture est conçue pour tomber en panne. Il signifie qu'un objet fonctionnel peut être rendu visuellement daté par rapport au modèle suivant. Couleurs, formes, chromes, calandres, carrosseries et détails de style deviennent des marqueurs temporels. Une voiture reçoit une date commerciale. Cette date peut désormais diverger de son état mécanique.

Le mécanisme est puissant parce qu'il transforme la perception du remplacement. Si une voiture de huit ans ressemble presque exactement à la nouvelle, le propriétaire doit trouver une raison fonctionnelle de changer. Si chaque nouvelle génération affiche extérieurement sa nouveauté, l'âge du véhicule devient visible. Le marché ne vend plus seulement une capacité de déplacement. Il vend aussi la différence entre « ce que j'ai » et « ce qui vient de sortir ».

Mais, là encore, réduire Sloan au style serait une erreur. Le renouvellement annuel fonctionne parce qu'il est couplé à d'autres mécanismes : amélioration réelle des véhicules,

hiérarchie de gamme, réseau de concessionnaires, reprise de l'ancien véhicule et financement du nouveau. C'est l'interliaison qui importe.

7. LE CRÉDIT : QUAND LA PRODUCTION DE MASSE RENCONTRE UNE LIMITE FINANCIÈRE

Produire continuellement des voitures pose une question simple : qui les paie avant qu'elles soient vendues ? L'article historique « Credit Cars » montre que la production de masse crée d'abord un problème de financement des concessionnaires. Les voitures sont produites en anticipation d'une demande future, tandis que les ventes restent saisonnières. Les concessionnaires doivent donc porter des stocks qu'ils n'ont pas toujours les moyens de financer.[9]

La finance automobile naît en partie de cette contrainte industrielle. General Motors crée GMAC en 1919. Sa fonction initiale est largement tournée vers le financement des stocks des concessionnaires, même si le financement de détail existe déjà. Au cours des années 1920, le système s'oriente de plus en plus vers le consommateur.[9][10] Ce déplacement change le marché.

Dans un achat au comptant, la question est : « Ai-je le prix de cette voiture aujourd'hui ? » Dans un achat à crédit, elle devient : « Puis-je supporter cette mensualité avec mes revenus futurs ? » La différence paraît financière. Elle est en réalité industrielle. Le crédit augmente le nombre de consommateurs capables d'acheter maintenant. Il permet donc aux usines de produire davantage maintenant.

Il relie la cadence présente de la chaîne au revenu futur du ménage. Le mécanisme devient rapidement massif. Les séries et reconstructions historiques ne donnent pas toutes la même date ni exactement le même périmètre : des travaux cités dans la

littérature placent déjà la part des voitures neuves achetées à crédit à un niveau très élevé au début des années 1920, tandis qu'une intervention de la Federal Reserve Bank of St. Louis en 1955 retient pour 1926 une estimation proche des deux tiers.[9] [11] Il serait donc trompeur de faire dépendre l'argument d'un pourcentage unique. Le phénomène, lui, est solidement établi : en quelques années, la vente à tempérament devient une infrastructure du marché automobile de masse.

8. REPRISE, GAMME ET RENOUVELLEMENT : LA SECONDE MACHINE

Le crédit ne fait pas qu'élargir l'accès. Il change aussi la logique du remplacement. Si le client revend ou fait reprendre son ancienne voiture, cette valeur devient un apport pour la suivante. Si le constructeur propose plusieurs niveaux de gamme, le client peut monter d'un échelon. Si le style change régulièrement, le nouveau modèle rend visible la différence.

Si le crédit transforme le solde restant en mensualités, l'écart entre les deux véhicules paraît plus petit que leur différence de prix total. Ces mécanismes ne sont pas identiques. Mais ensemble, ils créent quelque chose de nouveau. Ford avait construit une machine capable de produire massivement une voiture. Sloan contribue à construire une machine capable de produire massivement le renouvellement.

C'est probablement la transition la plus importante de ce chapitre. Dans la première phase du marché automobile, la croissance vient largement de l'équipement : vendre une voiture à quelqu'un qui n'en possède pas. À mesure que le parc se remplit, une industrie ne peut plus dépendre uniquement de nouveaux premiers acheteurs. Elle doit aussi organiser :

- le remplacement ;

- la montée en gamme ;
- le véhicule supplémentaire ;
- l'amélioration technique ;
- la différenciation esthétique ;
- l'occasion qui absorbe l'ancien véhicule.

Le marché secondaire devient alors un élément du marché du neuf. La vieille voiture n'est pas nécessairement détruite. Elle change de propriétaire. Ce point est essentiel pour la suite du livre. Le renouvellement commercial ne signifie pas automatiquement renouvellement physique de tout le parc.

Une voiture neuve vendue à son premier propriétaire peut repousser une voiture de trois ans vers un second, puis une autre plus ancienne vers un troisième. Le système organise donc une cascade. Il accélère le renouvellement du sommet de la pyramide sans imposer la disparition immédiate de chaque véhicule remplacé.

9. LA FRANCE : IMPORTER LE FORDISME, PUIS MASSIFIER AUTREMENT

L'histoire américaine pourrait donner l'impression que l'automobile de masse est inséparable d'un modèle institutionnel précis : grande entreprise privée, finance intégrée, marché de consommation et stratégie de marque. La France ne découvre pourtant pas la production de masse après 1945. André Citroën observe avant la Première Guerre mondiale les méthodes américaines et, après avoir utilisé une organisation de grande série pour les obus pendant le conflit, reconvertit l'usine du quai de Javel à l'automobile. Le Musée des Arts décoratifs décrit son projet de 1919 comme le passage d'une fabrication artisanale à une production industrielle de masse inspirée notamment des méthodes appliquées chez Ford.[12]

La Type A devient ainsi un jalon essentiel : Citroën la présente comme la première automobile construite en Europe en grande série. Son objectif déclaré est déjà de produire une voiture robuste, économique et livrée complète à un prix accessible.[13] Cette étape empêche de raconter l'histoire comme une simple transplantation américaine après-guerre. Mais 1945 ouvre une seconde expérience française, institutionnellement différente.

Renault est nationalisé en janvier 1945. L'ordonnance institue la Régie nationale des usines Renault comme établissement industriel et commercial doté d'une autonomie financière, placé sous contrôle public.[14] Cette précision est importante. Renault n'est pas simplement un ministère fabriquant des voitures avec des crédits budgétaires illimités. Le texte prévoit une entreprise industrielle qui vend, utilise le crédit et peut recourir à l'emprunt dans un cadre public.

La 4CV devient l'un des symboles de cette massification française. Renault indique que plus de 1,1 million d'exemplaires sont produits entre 1947 et 1961, ce qui en fait la première voiture française à dépasser le million.[15] Mais le plus intéressant pour notre enquête n'est pas le chiffre. C'est la manière dont Renault décrit sa propre transformation industrielle.

Avec la 4CV, l'entreprise standardise davantage de composants, intègre les contraintes de fabrication très tôt dans la conception et développe des machines-transfert capables d'automatiser des opérations d'usinage à une échelle nouvelle. Renault associe notamment cette transformation aux travaux de Pierre Bézier et à des capacités pouvant atteindre environ 300 moteurs par jour sur certaines installations.[16] Autrement dit, le principe découvert à Highland Park n'est pas une recette

américaine qu'il suffirait de copier. La logique générale se diffuse et se réinterprète : concevoir le produit pour rendre possible sa propre production de masse.

10. DERRIÈRE L'USINE : ÉNERGIE, ACIER, CRÉDIT, INFRASTRUCTURES

Une usine automobile peut être extraordinairement efficace et rester incapable de produire massivement si le système autour d'elle manque. Il lui faut de l'acier, de l'électricité et des carburants, des machines-outils, des moyens de transport, du capital, des fournisseurs capables de produire aux mêmes cadences et des réseaux de vente.

Après la Seconde Guerre mondiale, la France doit justement reconstruire plusieurs de ces couches simultanément. Le premier plan de modernisation cible notamment le charbon, l'électricité, l'acier, le ciment, les transports et le machinisme agricole. Le Plan Marshall apporte des biens, des devises et des fonds de contrepartie utilisés en partie pour reconstruire et moderniser le stock de capital.[17] Les documents américains de 1949 montrent qu'en France les fonds de contrepartie financent notamment EDF, Charbonnages de France, la reconstruction, la SNCF, l'agriculture et aussi l'industrie privée.[18] Il serait faux d'ajouter toutes ces dépenses et de les présenter comme « le coût public de la voiture ».

L'électricité alimente toute l'économie. L'acier ne sert pas uniquement aux automobiles. Le rail, le charbon et la reconstruction répondent à des fonctions multiples. Mais l'inverse serait tout aussi faux : imaginer que l'automobile de masse apparaît uniquement parce qu'un constructeur sait assembler une voiture. Elle apparaît lorsqu'un ensemble d'infrastructures industrielles devient suffisamment dense pour que des millions de véhicules puissent être produits, vendus,

ravitailés, utilisés et entretenus. C'est à ce moment que la voiture cesse définitivement d'être une machine isolée.

11. QUAND LA VOITURE DEVIENT UN SYSTÈME

Nous pouvons maintenant revenir à la question du début. À quel moment une invention devient-elle un système industriel ? Pas lorsque le premier prototype fonctionne. Pas même lorsque la première usine ouvre. Elle devient un système lorsque sa reproduction à grande échelle dépend d'institutions qui commencent à se renforcer mutuellement. La standardisation exige des fournisseurs standardisés. Le volume exige une demande de masse.

La demande de masse exige un prix accessible ou du crédit. Le crédit exige des institutions financières, des contrats, des garanties et un marché de revente. Le renouvellement exige des raisons techniques, économiques ou symboliques de remplacer. La diversité commerciale exige des plateformes capables de produire plusieurs variantes sans perdre les économies d'échelle. La production exige énergie, acier, machines et logistique.

L'usage exige carburant, routes, entretien et stationnement. Chaque couche renforce les autres. Une fois ce réseau suffisamment développé, la voiture devient difficile à analyser séparément de lui. C'est là que se trouve le changement historique principal. Ford n'a pas simplement accéléré une chaîne. Il a créé une boucle industrielle dans laquelle la productivité réduisait le prix, le prix augmentait la demande et la demande justifiait davantage de productivité.

Sloan et GM n'ont pas simplement ajouté des couleurs. Ils ont développé une boucle commerciale où gamme, style, crédit, reprise et changement régulier de modèle facilitaient le

renouvellement. La France d'après-guerre montre qu'un système politique et financier différent peut lui aussi organiser la massification dès lors que l'infrastructure productive nécessaire existe. Ces logiques ne s'annulent pas : elles s'empilent. La voiture moderne reste produite par des chaînes extrêmement standardisées, vendue par différenciation, financée, reprise et dépendante d'une infrastructure collective immense.

12. DE LA PRODUCTION DE MASSE AU RENOUVELLEMENT DE MASSE

Le XXe siècle automobile peut donc être lu comme deux conquêtes successives. La première est la conquête du coût. Comment fabriquer une machine suffisamment peu chère pour qu'un marché de masse existe ? Ford donne une réponse spectaculaire : standardiser, décomposer, faire circuler le produit, augmenter le volume, améliorer sans cesse le procédé. La seconde est la conquête du renouvellement.

Que se passe-t-il lorsque des millions de personnes possèdent déjà une voiture ? GM donne une autre réponse : segmenter, différencier, financer, reprendre, modifier, améliorer et dater commercialement les modèles. Ces deux logiques sont encore parmi nous. Elles permettent de comprendre pourquoi une industrie capable de standardiser des millions de pièces produit malgré tout des véhicules visiblement différents.

Pourquoi une voiture peut être techniquement valable et commercialement vieille. Pourquoi le crédit n'est pas seulement un service bancaire ajouté après la fabrication mais une condition de la cadence industrielle. Pourquoi l'État peut devenir propriétaire, financeur, planificateur ou constructeur d'infrastructures sans pour autant fabriquer seul le marché. Et

surtout pourquoi la question centrale de ce livre ne peut pas être :

« Pourquoi les constructeurs ne font-ils pas simplement une voiture qui dure ? » Avant de répondre, il faut comprendre ce que le système automobile a été construit pour optimiser. Le chapitre suivant entre précisément dans cette machine. Non plus à l'échelle de l'histoire industrielle, mais à l'intérieur du véhicule lui-même : comment décide-t-on ce qui doit être solide, sûr, accessible, remplaçable, standardisé ou maintenable ?

NOTES ET SOURCES

[1] The Henry Ford, « Ford Methods and the Ford Shops », 2021. Le musée décrit la combinaison de pièces interchangeables, division du travail et mouvement du produit, ainsi que le passage d'environ 12,5 heures à 93 minutes par Model T.

[2] Ford Motor Company, « The Moving Assembly Line and the Five-Dollar Workday », 2020 ; « The Model T », 2020. Ford indique notamment un prix du Model T passant d'environ 825 dollars en 1908 à environ 260 dollars en 1925.

[3] Ford Motor Company, « The Moving Assembly Line and the Five-Dollar Workday », 2020. La source décrit les difficultés de rétention de la main-d'œuvre et le Five-Dollar Day.

[4] The Henry Ford, « Henry Ford: A Visionary Innovator Who Shaped America » ; « Ford's Five-Dollar Day ». Les sources reviennent sur le turnover massif et la combinaison entre salaires, discipline industrielle et stabilisation des effectifs.

[5] The Henry Ford, Bob Casey, « Ford's Model T: A Car for the Great Multitude ». Le musée relie le déclin du Model T à l'évolution des routes et des attentes en matière de puissance, confort, vitesse et style.

[6] General Motors, histoire institutionnelle, formule associée à Alfred Sloan : « a car for every purse and purpose ».

[7] General Motors, « The Driving Machine: Take a trip through the history of car design », 2024. La source décrit la hiérarchie de marques, le partage de composants et les changements annuels associés à Sloan.

[8] Smithsonian National Museum of American History, « Designed to Sell ». Le musée attribue à GM dans les années 1920 l'annual model change et la design obsolescence comme stratégie commerciale.

- [9] Andrea Freeman et al., « Credit Cars: Or How I Learned to Stop Worrying and Love Auto Loans », *Law & Social Inquiry*, 2024. L'article retrace la naissance des sociétés de financement automobile, GMAC en 1919, le financement des concessionnaires puis des consommateurs, et l'importance du crédit dans le marché de masse.
- [10] Ally Financial, « History of Ally ». L'entreprise retrace son origine comme GMAC en 1919 et le passage progressif du financement des stocks des concessionnaires au financement de détail.
- [11] Federal Reserve Bank of St. Louis / FRASER, Delos C. Johns, « Credit for Consumers », 1955. Le discours cite pour 1926 une estimation proche des deux tiers des voitures neuves vendues à tempérament ; les séries historiques et estimations contemporaines ne coïncident pas toutes exactement sur la date et le périmètre.
- [12] Musée des Arts décoratifs, « Histoire de l'entreprise » (André Citroën). La source décrit l'observation par Citroën des méthodes tayloriennes et fordistes, leur déploiement à Javel pour la production d'obus, puis la reconversion de l'usine en 1919 vers la production automobile de masse.
- [13] Citroën / Stellantis Media, « Centenaire de Citroën : 10 HP Type A, les fondements du succès », 2019. Citroën présente la Type A de 1919 comme la première automobile construite en Europe en grande série et relie explicitement sa conception et sa fabrication au modèle Ford.
- [14] Ordonnance n°45-68 du 16 janvier 1945 portant nationalisation des usines Renault, Légifrance. La Régie nationale des usines Renault est créée comme établissement industriel et commercial doté d'autonomie financière sous contrôle public.
- [15] Renault, The Originals Museum, « 4CV ».
- [16] Renault Group, « 80 years of the Renault 4CV: the car that put Renault and France back on the road », 4 septembre 2026.
- [17] Banque de France, « Les leçons du plan Marshall pour le plan de relance européen », mise à jour 2024.
- [18] U.S. Department of State, Foreign Relations of the United States, 1949, document 389.

CHAPITRE 2 — CONCEVOIR POUR FABRIQUER, UTILISER ET MAINTENIR

OUVERTURE — UNE PIÈCE DIX FOIS PLUS RÉSISTANTE ?

Un ingénieur reçoit une demande apparemment simple : augmenter fortement la résistance d'une pièce sans changer la matière, sans ajouter de coût significatif et sans modifier les machines de production. Il travaille sur la géométrie. La pièce obtenue serait, selon le récit qui nous a été transmis, non pas trois fois mais environ dix fois plus résistante. La réaction de sa hiérarchie aurait alors été : « Nous avions demandé trois fois, pas dix. »

L'histoire est séduisante. Elle contient tout ce que nous aimons projeter sur l'industrie automobile : l'ingénieur capable de faire beaucoup mieux, la hiérarchie obsédée par le strict minimum, et derrière elle l'idée implicite d'un système qui ne veut surtout pas fabriquer trop durable. Mais à ce stade, cette histoire n'est qu'un témoignage indirect. Nous ne savons pas quelle pièce était concernée, quelle résistance était mesurée, si le gain portait sur la rupture, la fatigue, la flexion ou le choc, ni si une rigidité dix fois supérieure créait ailleurs un problème de crash, de vibration, de transfert de contraintes, de masse ou de validation. Elle ne peut donc rien prouver.

Elle pose néanmoins une bonne question. Pourquoi un cahier des charges s'arrête-t-il à un niveau donné lorsque davantage semble techniquement possible ? Cette question est plus intéressante que l'accusation d'obsolescence programmée, parce qu'elle oblige à regarder ce qu'est réellement un véhicule industriel. Une voiture n'est pas une collection de pièces que

l'on chercherait à rendre aussi solides que possible. C'est un système de compromis. Chaque composant doit satisfaire plusieurs contraintes simultanément : coût, masse, encombrement, cadence de production, sécurité, bruit, consommation, émissions, résistance, recyclabilité, disponibilité des matériaux, maintenance, garantie, réglementation, confort et désormais logiciel. La difficulté commence ici : « durer » n'est pas une fonction unique.

1. LA MAUVAISE QUESTION : POURQUOI NE PAS FAIRE INDESTRUCTIBLE ?

L'image de la voiture indestructible est trompeuse parce qu'un système complexe n'a pas de maximum unique. Prenons une structure de carrosserie. La rendre plus rigide peut améliorer la tenue géométrique. La rendre capable de se déformer à certains endroits peut au contraire sauver les occupants lors d'un choc. Une pièce extrêmement résistante peut déplacer l'effort vers une fixation plus fragile. Un matériau plus épais peut augmenter la masse, donc l'énergie consommée, l'énergie de collision et la charge sur pneus et suspensions. Un assemblage entièrement soudé peut être très robuste mais beaucoup plus difficile à remplacer après accident. Une grande pièce moulée peut réduire le nombre de composants, le temps d'assemblage et parfois la masse, tout en transformant une collision locale en réparation structurelle complexe.

L'automobile moderne résulte justement de décennies durant lesquelles la sécurité a imposé des contraintes contradictoires avec la simple robustesse. Aux États-Unis, la NHTSA estime que le véhicule moyen de 2012 présentait un risque mortel pour ses occupants environ 56 % inférieur à celui d'un véhicule de la fin des années 1950. L'agence estime aussi que les améliorations de sécurité ont sauvé plus de 600 000 vies cumulées entre 1960 et

2012.[1] Cela ne signifie pas que toute complexité est justifiée. Cela signifie qu'une petite voiture ancienne simple à démonter n'est pas un étalon suffisant pour juger une voiture actuelle. La sécurité passive, les airbags, l'ABS, l'ESP, les structures à absorption d'énergie, les prétensionneurs, puis les systèmes d'évitement de collision ont changé la fonction même de l'objet. Une voiture durable mais dangereuse n'est pas une réussite. La question devient donc : durable de quelle manière, et à quel prix ?

2. CINQ SENS DIFFÉRENTS DU MOT « DURER »

Une grande partie des confusions vient de ce que nous utilisons le même mot pour désigner des réalités différentes. La durabilité technique désigne la capacité physique d'un système ou d'une pièce à rester fonctionnel. Un bloc moteur peut être techniquement capable d'atteindre un kilométrage très élevé. La fiabilité désigne la probabilité de fonctionner sans panne pendant une durée ou un kilométrage donnés. Une machine peut être durable au sens où elle reste réparable pendant trente ans tout en connaissant régulièrement des pannes. Une autre peut être extrêmement fiable pendant huit ans puis devenir économiquement impossible à réparer après une défaillance rare.

La maintenabilité désigne la facilité avec laquelle on peut diagnostiquer, accéder, démonter, remettre en état et remettre en service le système. Deux véhicules ayant exactement la même panne peuvent immobiliser leur propriétaire une heure ou plusieurs jours selon la conception. La réparabilité économique compare le coût réel de remise en état à la valeur du véhicule et au coût de son remplacement. Une voiture peut être techniquement réparable et pourtant être déclarée perte totale.

Enfin, la longévité réelle est la durée pendant laquelle le véhicule reste effectivement en circulation. Elle dépend de toutes les dimensions précédentes, mais aussi de la valeur d'occasion, du revenu du propriétaire, du prix des pièces, de l'assurance, des politiques publiques et du marché international de l'occasion. Ces distinctions changent complètement notre manière d'interroger l'industrie.

Une voiture moderne peut vivre plus longtemps qu'une ancienne, être plus sûre, connaître moins de pannes mécaniques graves, mais être beaucoup plus coûteuse à remettre en état après un choc léger. Elle peut aussi rester physiquement fonctionnelle tout en dépendant d'un diagnostic propriétaire, d'un logiciel, d'une calibration ou d'un module électronique indisponible. Le problème n'est donc pas : « Est-elle solide ? » Le problème est : « Quelles formes de durée son architecture rend-elle possibles ? »

3. LA VOITURE N'EST PAS CONÇUE PAR UN SEUL ACTEUR

Nous parlons souvent du « constructeur » comme si une entreprise dessinait entièrement chaque vis, chaque capteur et chaque calculateur. Ce n'est plus depuis longtemps la réalité. Un véhicule contemporain résulte d'un réseau. Le constructeur définit une partie de l'architecture et des exigences. Des équipementiers de rang 1 conçoivent des sous-systèmes complets : freinage, sièges, éclairage, électronique de puissance, systèmes thermiques, calculateurs. D'autres fournisseurs produisent capteurs, puces, matériaux, connecteurs, logiciels et composants élémentaires. Certaines pièces sont conçues sous cahier des charges précis du constructeur ; d'autres sont adaptées à partir de briques techniques proposées par le fournisseur. Des normes de sécurité, d'émissions, de

cybersécurité ou de diagnostic ajoutent encore des contraintes extérieures.

Cette distribution de la conception apparaît jusque dans les comptes financiers. Ford et General Motors ne provisionnent pas seulement leurs propres coûts de garantie ; ils comptabilisent aussi des récupérations auprès de fournisseurs lorsque la responsabilité d'un défaut est attribuée à un composant fourni.[2][3] Autrement dit, lorsqu'un mécanicien demande : « Pourquoi ont-ils mis cette pompe ici ? », il n'existe pas toujours un « ils » unique.

La position d'une pièce peut résulter de la collision entre :

- le packaging du véhicule ;
- le cheminement thermique ;
- le coût d'assemblage ;
- la plateforme commune à plusieurs modèles ;
- les exigences du fournisseur ;
- l'ordre de montage sur ligne ;
- la protection en cas de choc ;
- le bruit ;
- l'aérodynamique ;
- la réglementation ;
- et seulement ensuite la facilité d'accès en atelier.

Cette observation ne disculpe personne. Elle précise la responsabilité. Pour améliorer la maintenabilité, il faut savoir quel acteur peut réellement modifier quoi et quel indicateur lui donne intérêt à le faire.

4. L'INDUSTRIE APPREND VRAIMENT DES PANNES

L'une de nos intuitions initiales devait être corrigée : l'industrie automobile ne repart pas de zéro à chaque génération. Elle dispose de systèmes extrêmement formalisés pour anticiper et apprendre les défaillances. Les méthodes FMEA — analyse des modes de défaillance et de leurs effets — obligent à identifier des modes de panne possibles, leurs conséquences, leurs causes et les mesures de prévention ou de détection. La pratique automobile est formalisée notamment par SAE J1739, dont la version stabilisée en 2026 couvre DFMEA, FMEA-MSR et PFMEA et vise explicitement l'identification et la réduction des risques.[10] Les processus de conception et d'industrialisation utilisent aussi les essais de validation, les campagnes de rappel, les retours de garantie, les données de réclamation et les analyses fournisseurs.

Les comptes des constructeurs montrent à quel point cette boucle a une traduction financière. Ford explique utiliser, pour chaque ligne de véhicules et chaque année-modèle, les historiques de nature, fréquence et coût moyen des réclamations pour estimer ses obligations futures. L'entreprise réévalue ensuite ses provisions lorsque les données réelles deviennent disponibles. À la fin de 2025, Ford provisionnait environ 17,19 milliards de dollars pour les coûts futurs de garantie et d'actions terrain, nets des récupérations fournisseurs.[2]

General Motors faisait de même. Fin 2025, ses passifs liés aux garanties et campagnes de rappel atteignaient environ 13,6 milliards de dollars. Sa charge de garantie nette des récupérations fournisseurs s'élevait à environ 7,9 milliards sur l'année.[3] Ces montants suffisent à écarter une théorie trop facile : une panne sous garantie n'est pas automatiquement

bonne pour le constructeur. Elle peut coûter très cher, déclencher un rappel, immobiliser des équipes, dégrader la réputation et entraîner des litiges.

Alors pourquoi les mécaniciens rencontrent-ils malgré tout des « maladies » caractéristiques de certains modèles ? Parce qu'apprendre ne signifie pas figer l'architecture. Une entreprise peut corriger une faiblesse et, simultanément, modifier la plateforme pour une autre raison : norme de crash, émissions, électrification, coût de fabrication, nouveau fournisseur, réduction de masse, architecture électronique, design intérieur, nouvelle gamme ou changement de réglementation. La correction acquise sur l'ancienne architecture n'est pas toujours transférable.

Le vrai paradoxe n'est donc pas l'absence d'apprentissage. C'est la coexistence de deux vitesses. D'un côté, la boucle de fiabilité cherche à réduire les défaillances d'un produit existant. De l'autre, la boucle industrielle cherche à lancer le produit suivant. Le mécanicien rêve souvent d'une plateforme stable sur laquelle chaque maladie serait éliminée au fil des générations. L'industrie, elle, doit aussi répondre à des contraintes qui peuvent rendre rentable ou obligatoire le changement d'architecture. C'est cette tension qu'il faut examiner, pas la caricature d'une amnésie organisée.

5. STANDARDISER POUR PRODUIRE N'EST PAS STANDARDISER POUR RÉPARER VINGT ANS

Autre correction importante : l'industrie automobile sait déjà standardiser à très grande échelle. Toyota décrit son approche TNGA comme une refonte des architectures de base accompagnée d'un « partage intelligent » entre modèles, fournisseurs et sites de production.[4] Stellantis annonce pour sa nouvelle architecture STLA One un objectif allant jusqu'à 70

% de réutilisation de composants sur ses grandes plateformes mondiales, avec une même architecture destinée à couvrir de nombreux modèles.[5] Donc la question « pourquoi chaque voiture a-t-elle des pièces différentes ? » doit être affinée.

Beaucoup de pièces sont déjà mutualisées. Ce que l'industrie cherche principalement à standardiser, cependant, est ce qui augmente l'efficacité industrielle : interfaces de plateforme, moteurs, modules électroniques, points d'assemblage, composants invisibles, outils de production, développement logiciel. Cette standardisation n'est pas nécessairement la même chose que la compatibilité temporelle. Une plateforme commune à dix modèles peut être excellente pour produire deux millions de véhicules et pourtant ne garantir aucune des choses suivantes :

- que la pièce restera fabriquée pendant vingt ans ;
- qu'un module de 2035 pourra remplacer celui de 2028 ;
- qu'une interface électronique restera ouverte ;
- qu'un calculateur d'occasion pourra être recodé ;
- que les plans resteront accessibles ;
- qu'un utilisateur pourra installer une amélioration sur le véhicule ancien ;
- qu'un fournisseur tiers pourra reproduire légalement et techniquement le composant.

C'est ici qu'apparaît peut-être l'une des questions les plus fortes du livre : pourquoi la standardisation est-elle poussée extrêmement loin à l'intérieur du système de production, mais beaucoup moins souvent transformée en compatibilité durable du côté de l'utilisateur ? La réponse ne sera probablement pas unique.

Une interface figée trop longtemps peut freiner l'innovation. Une pièce nouvelle peut permettre un meilleur crash, moins de masse ou un rendement supérieur. Une électronique ancienne peut poser un problème de cybersécurité. Maintenir vingt ans de compatibilité peut obliger à conserver des contraintes devenues inutiles. Et certaines pièces sont justement différenciées parce que cette différenciation permet de vendre des modèles distincts sur une base commune. Mais l'absence de compatibilité n'est pas davantage une fatalité naturelle. C'est un choix d'architecture. Et comme tout choix d'architecture, il pourrait être mesuré.

6. CE QUE LA SÉCURITÉ MODERNE A GAGNÉ — ET CE QU'ELLE COMPLIQUE

La sécurité constitue le meilleur antidote à une nostalgie trop simple. Les véhicules modernes sont plus lourds en capteurs, calculateurs, renforts, zones déformables, airbags et systèmes d'assistance. Cette complexité peut faire grimper le coût de réparation. Mais elle ne peut pas être jugée seulement à partir de la facture de carrosserie. Prenons les ADAS. Une caméra derrière le pare-brise ou un radar dans le pare-chocs peut nécessiter une calibration après remplacement. Un choc qui autrefois aurait demandé uniquement une pièce de carrosserie peut maintenant toucher un capteur coûteux. L'IIHS observe effectivement une hausse de la sévérité moyenne de certaines réparations sur les véhicules équipés de systèmes d'évitement de collision.[6]

Mais la même étude rappelle la moitié que l'on oublie facilement : ces systèmes empêchent aussi des collisions. Pour un assureur, le bon indicateur n'est donc pas uniquement le coût de la réparation lorsque le choc a eu lieu. Il faut multiplier la fréquence des sinistres par leur coût moyen. Selon l'IIHS, les

systèmes d'évitement peuvent augmenter le coût unitaire de certains sinistres tout en réduisant les pertes totales parce qu'ils diminuent suffisamment le nombre de collisions.[6]

Voilà exactement le type de contradiction que doit préserver notre critique. Une technologie peut simultanément :

- rendre un véhicule plus cher à réparer ;
- réduire sa probabilité d'accident ;
- sauver des vies ;
- augmenter les exigences de compétence de l'atelier ;
- créer une dépendance à la calibration ;
- et diminuer le coût total du risque.

Dire seulement « plus complexe donc moins bon » détruit l'information la plus importante. La vraie question devient : peut-on conserver le bénéfice de sécurité tout en réduisant le coût de remise en état ? C'est là que la maintenabilité redevient une fonction de conception.

7. RÉPARER AVEC UNE CLÉ, UN DIAGNOSTIC, UN SERVEUR ET UN DROIT D'ACCÈS

Pendant une grande partie de l'histoire automobile, la réparabilité pouvait être imaginée essentiellement comme une question mécanique : accéder à la pièce, la démonter, la réparer ou la remplacer. Cette définition n'est plus suffisante. Une voiture moderne peut être mécaniquement ouverte et néanmoins pratiquement irréparable sans :

- un diagnostic électronique ;
- un logiciel constructeur ;
- une procédure de calibration ;
- un droit d'accès à une fonction sécurisée ;

- une base de données ;
- une clé cryptographique ;
- une connexion serveur ;
- ou une version logicielle compatible.

Le droit européen reconnaît explicitement cette transformation. Le règlement (UE) 2018/858 impose aux constructeurs de fournir aux opérateurs indépendants un accès non discriminatoire et normalisé aux données OBD, aux équipements et outils de diagnostic, aux logiciels applicables et aux informations de réparation et d'entretien. Il prévoit également l'accès aux services de diagnostic à distance et un mécanisme sécurisé pour les opérations touchant aux systèmes de sécurité.[7] Cette obligation est remarquable parce qu'elle dit implicitement quelque chose de profond : posséder physiquement le véhicule ne suffit plus pour garantir que l'écosystème indépendant puisse le maintenir.

Le véhicule est devenu une infrastructure informationnelle. La cybersécurité rend le problème encore plus délicat. Les règlements ONU 155 et 156 encadrent désormais, dans les régimes d'homologation qui les appliquent, la gestion de la cybersécurité et des mises à jour logicielles, avec contrôle des versions, processus de validation et organisation formalisée des mises à jour.[8] Ils ne fixent toutefois pas, à eux seuls, une durée universelle pendant laquelle chaque constructeur devrait maintenir toutes les fonctions logicielles d'un véhicule. La durée effective de support reste donc une question distincte à documenter marque par marque et système par système.

Cette exigence est légitime. Une voiture connectée dont n'importe qui pourrait modifier sans contrôle le freinage, la direction ou les aides à la conduite serait un risque évident.

Mais la sécurité informatique crée une nouvelle tension : plus on ferme l'accès pour protéger le véhicule, plus on peut rendre la maintenance dépendante d'un acteur central. La question du droit à la réparation devient donc moins naïve qu'un simple « ouvrez les logiciels ».

Il faut simultanément :

- empêcher la falsification ;
- protéger les données ;
- assurer la cybersécurité ;
- autoriser l'entretien indépendant ;
- maintenir les pièces et outils ;
- conserver une traçabilité ;
- éviter qu'une panne de serveur ou une fin de support condamne prématurément le véhicule.

La maintenabilité moderne n'est plus seulement une qualité mécanique. C'est une architecture de confiance.

8. QUAND LE VÉHICULE TECHNIQUEMENT VIVANT DEVIENT ÉCONOMIQUEMENT MORT

Une panne ne condamne pas une voiture uniquement lorsqu'elle est impossible à réparer. Elle la condamne lorsque personne n'a intérêt à payer la réparation. C'est particulièrement visible après accident. Un assureur compare le coût estimé de remise en état, les risques associés et la valeur résiduelle du véhicule. À dommage égal, une voiture récente et chère peut être réparée alors qu'un véhicule ancien de faible valeur partira en perte totale.

Le phénomène ne date pas de l'électrique. Mais la batterie haute tension le rend spectaculaire. Thatcham Research a publié en 2026 un ensemble de recommandations précisément destiné

à éviter des pertes totales inutiles de véhicules électriques. L'organisme souligne qu'une batterie peut représenter jusqu'à environ 40 % de la valeur du véhicule. Un dommage relativement local à un carter ou à un support peut devenir économiquement catastrophique si la procédure impose de remplacer le pack complet.[9]

Le problème n'est pas alors la batterie en elle-même. C'est la combinaison :

- architecture ;
- procédure officielle ;
- capacité de diagnostic ;
- disponibilité de pièces séparées ;
- prix du pack neuf ;
- accès à des éléments reconditionnés ;
- valeur résiduelle de la voiture.

Thatcham recommande notamment des supports réparables, un accès simplifié aux dispositifs pyrotechniques de coupure, des méthodes claires d'évaluation des dommages et des solutions de réparation du carter qui n'imposent pas nécessairement le remplacement de toute la batterie.[9] Ce cas rend visible une idée plus générale.

La durée de vie économique n'est pas contenue dans la matière. Elle est fabriquée par l'écosystème de réparation. Une pièce peut être physiquement intacte mais condamnée parce qu'elle ne se vend pas séparément. Un module peut fonctionner mais être inutilisable faute de codage. Une batterie peut être encore saine mais rejetée parce qu'aucune méthode reconnue ne permet de certifier son état après accident. Un phare peut nécessiter le remplacement d'un ensemble coûteux alors que

seule une fonction secondaire est endommagée. La « mort » du véhicule peut donc survenir à plusieurs niveaux :

- physique ;
- électronique ;
- informationnel ;
- juridique ;
- assurantiel ;
- économique.

Une politique de durabilité qui ne traite que la résistance mécanique manque la moitié du problème.

9. LA BATTERIE COMME TEST DE MAINTENABILITÉ

Le véhicule électrique a l'avantage analytique de rendre les arbitrages très visibles. Son groupe motopropulseur contient moins de pièces mécaniques mobiles qu'un thermique traditionnel. Il peut supprimer huile moteur, échappement complexe, embrayage, boîte multi-rapports et une grande partie de l'usure des freins grâce à la régénération. Mais il ajoute une batterie coûteuse, de l'électronique de puissance, une gestion thermique et une architecture haute tension.

Cette architecture haute tension modifie aussi le travail de l'atelier. En France, la prévention du risque électrique sur les véhicules et engins relève notamment de la norme NF C 18-550. L'INRS rappelle que le type d'habilitation dépend de l'opération, de la tension, de l'état des connectiques et de l'environnement de travail ; en l'absence d'un indice de protection adéquat, le seuil général à partir duquel une habilitation devient nécessaire est notamment supérieur à 60 V en courant continu.[11] Pour la réparation et l'entretien des véhicules électriques ou hybrides, l'INRS recommande également d'identifier le risque, de former

ou habiliter le personnel selon l'opération et de matérialiser un espace spécifique lorsque l'intervention l'exige.[11]

Le risque n'est pas abstrait. Un court-circuit peut résulter de la chute ou de l'introduction d'un outil conducteur entre des parties nues portées à des potentiels différents ; l'arc électrique qui peut en résulter expose à des brûlures et peut provoquer incendie ou explosion.[11] La bonne réponse n'est donc pas de considérer le véhicule électrique comme intrinsèquement irréparable, mais d'organiser l'intervention : mise hors tension ou consignation lorsque l'opération le requiert, vérification de l'absence de tension, isolation des parties exposées, outillage et équipements adaptés, personnel compétent.[11]

Cette prévention a un coût réel. Elle demande formation, temps de procédure, équipement, organisation de l'atelier et parfois une spécialisation que tous les garages indépendants ne possèdent pas immédiatement. L'électricien peut donc réduire une partie de l'entretien mécanique courant tout en augmentant la technicité et les contraintes de sécurité de certaines réparations. Pour juger la maintenabilité d'un véhicule, il faut alors compter non seulement le nombre de pièces susceptibles de s'user, mais aussi les conditions dans lesquelles un atelier peut intervenir sur celles qui restent.

Cela pourrait conduire à deux véhicules très différents. Dans le premier, la batterie est structurellement intégrée, difficile à ouvrir, peu documentée, avec peu de pièces réparables et un remplacement complet comme solution standard. Le véhicule peut être très efficace à produire et excellent en masse ou rigidité, mais fragile économiquement après certaines défaillances. Dans le second, la conception accepte peut-être quelques centaines de grammes ou quelques euros supplémentaires pour rendre le carter réparable, les dispositifs

de coupure accessibles, le diagnostic partagé et les modules remplaçables.

Aucune des deux solutions n'est automatiquement supérieure. L'intégration structurelle peut réellement réduire masse, volume et coût. Un pack très modulaire peut ajouter des interfaces, des fixations, des pièces, de la masse et des points de défaillance. La réparabilité parfaite n'existe pas davantage que la solidité parfaite. Mais la différence fondamentale est que ces conséquences devraient être évaluées avant la production.

On sait mesurer la masse, le coefficient aérodynamique, le temps de recharge, l'accélération, les émissions et le coût de fabrication. On pourrait aussi mesurer :

- temps moyen d'accès à un organe ;
- coût de remplacement d'un sous-ensemble ;
- pourcentage de pannes réparables sans remplacer l'ensemble ;
- nombre d'outils propriétaires nécessaires ;
- disponibilité des pièces à dix ou quinze ans ;
- taux de compatibilité entre générations ;
- durée de support logiciel ;
- coût de remise en service après un choc standardisé.

La maintenabilité pourrait devenir un indicateur industriel aussi explicite que les performances.

10. LA « 2CV ÉVOLUTIVE » : EXPÉRIENCE DE PENSÉE, PAS RETOUR EN ARRIÈRE

L'idée d'une 2CV évolutive est séduisante parce qu'elle inverse la logique habituelle. Au lieu de lancer une plateforme puis de la remplacer lorsque son cycle commercial est terminé,

on pourrait imaginer une architecture conçue pour être conservée vingt ou trente ans, avec :

- pièces mécaniques largement communes ;
- interfaces documentées ;
- modules électroniques remplaçables ;
- améliorations de sécurité rétroadaptables lorsqu'elles sont techniquement possibles ;
- documentation ouverte aux réparateurs ;
- disponibilité longue des pièces ;
- carrosserie et intérieur démontables ;
- standardisation forte des composants d'usure ;
- batterie ou groupe motopropulseur pouvant évoluer.

Ce véhicule n'aurait pas pour objectif de rester techniquement figé comme une voiture de 1950. Il chercherait au contraire à séparer ce qui doit changer de ce qui peut rester.

Le châssis ou la cellule pourrait avoir un cycle très long. Les modules de sécurité ou d'électronique pourraient évoluer. Les fonctions esthétiques seraient dissociées des structures coûteuses. Une amélioration logicielle ne forcerait pas nécessairement un changement de matériel complet. Cette architecture ressemble moins à un objet de mode qu'à une infrastructure entretenue. Mais elle rencontre immédiatement des objections sérieuses.

Que faire lorsque de nouvelles normes de crash imposent une géométrie différente ? Lorsqu'un moteur doit changer pour respecter une limite d'émission ? Lorsqu'une vulnérabilité cryptographique rend une ancienne architecture électronique obsolète ? Lorsqu'un nouveau matériau permet une réduction massive de masse ? Lorsqu'une batterie ancienne ne correspond

plus aux standards de sécurité ? Une compatibilité absolue sur trente ans peut devenir un piège.

C'est pourquoi l'objectif pertinent n'est pas de figer la voiture. C'est de créer une compatibilité raisonnable et intentionnelle. L'aviation, le ferroviaire, les machines industrielles ou les poids lourds montrent qu'un système peut durer longtemps tout en changeant de pièces, de logiciels et de sous-systèmes. Ce qui dure n'est pas chaque composant. C'est l'architecture de maintenance.

11. POURQUOI NE PAS OPTIMISER DAVANTAGE LA MAINTENABILITÉ ?

Nous arrivons alors au cœur du problème. L'automobile dispose :

- d'analyses de défaillance ;
- de retours de garantie ;
- de plateformes communes ;
- de chaînes logistiques mondiales ;
- de logiciels pouvant être mis à jour ;
- de normes de diagnostic ;
- de capacités de remanufacturing ;
- d'outils de simulation extrêmement avancés.

Pourquoi la maintenabilité n'est-elle pas plus souvent un argument central de conception et de vente ?

La première réponse est simple : parce qu'elle n'est qu'un objectif parmi d'autres. Un constructeur vend un véhicule neuf à un client qui valorise prix, esthétique, confort, sécurité, consommation, puissance, autonomie, image et mensualité. Une amélioration de réparabilité qui augmente le prix d'achat peut

être difficile à valoriser si son bénéfice apparaîtra douze ans plus tard chez le troisième propriétaire.

La seconde réponse tient à la distribution des coûts. Cinq euros économisés à l'usine sont certains, immédiats et multipliés par des centaines de milliers de véhicules. Deux heures de main-d'œuvre ajoutées à une réparation future sont incertaines, dispersées dans le temps et supportées par un autre acteur. Cette asymétrie est fondamentale. Le constructeur voit directement le coût industriel. Le coût de maintenance futur peut être supporté par le propriétaire, l'assureur, le garage, l'acheteur d'occasion ou la collectivité via les déchets. Même lorsqu'il nuit à la valeur résiduelle ou à l'image de marque, il apparaît plus tard et plus indirectement.

La troisième réponse est que certaines formes de maintenabilité peuvent réduire d'autres avantages. Rendre une pièce accessible peut augmenter le volume. Ajouter des connecteurs démontables peut ajouter masse, coût ou risque d'infiltration. Séparer un ensemble structurel peut réduire rigidité ou augmenter nombre de fixations. Maintenir plusieurs décennies de compatibilité logicielle augmente la charge de développement et de cybersécurité.

Enfin, la différenciation commerciale compte. Si tous les modules deviennent standardisés, remplaçables et compatibles entre marques, une partie de la valeur captée par le constructeur peut migrer vers les fournisseurs et le marché indépendant. L'ouverture d'une interface n'est donc pas seulement une décision technique ; elle redistribue du pouvoir économique. Ce chapitre s'arrête volontairement ici : il identifie les arbitrages de conception qui rendent possible ou difficile la maintenance. Le chapitre suivant devra expliquer séparément comment constructeurs, captives financières, concessionnaires,

assureurs et marché indépendant captent la valeur créée par ces choix. Mélanger les deux ferait confondre le COMMENT technique avec le POURQUOI économique. Voilà pourquoi le droit à la réparation est aussi une politique de marché.

12. DÉPLACER L'OPTIMUM

Le résultat le plus important de cette enquête n'est pas que les voitures modernes seraient mal conçues. C'est presque l'inverse. Elles sont extraordinairement bien optimisées — mais pour plusieurs objectifs qui ne coïncident pas toujours. L'usine optimise le temps d'assemblage et le coût unitaire. L'ingénieur sécurité optimise la protection en cas de choc. Le responsable homologation optimise la conformité.

Le fournisseur optimise son sous-système. Le constructeur optimise plateforme, volume et différenciation. Le service financier pense valeur résiduelle. Le concessionnaire pense entretien et fidélité. L'assureur pense fréquence et sévérité des sinistres. Le propriétaire pense prix d'achat, mensualité, usage et coût de panne. Le mécanicien pense accessibilité, diagnostic et temps de main-d'œuvre. Le troisième propriétaire pense surtout : « Est-ce encore rentable à réparer ? »

Aucun de ces acteurs ne porte seul le coût complet du véhicule pendant vingt ans. C'est peut-être là que se trouve la vraie faiblesse du système. Pas dans une intention cachée de fabriquer fragile, mais dans une fragmentation de l'optimum. Une architecture industrielle orientée vers la durée devrait donc faire quelque chose de plus difficile que « renforcer les pièces ». Elle devrait aligner les horizons.

Elle devrait rendre visibles, dès la conception :

- le coût de maintenance futur ;
- la compatibilité entre générations ;

- l'accès au diagnostic ;
- la durée de support logiciel ;
- le coût d'un choc standardisé ;
- la disponibilité des pièces ;
- la possibilité de remanufacturer ;
- le coût matériel d'un remplacement prématuré.

Autrement dit, il ne s'agit pas de demander à l'ingénieur de faire une pièce dix fois plus résistante. Il s'agit de demander au système entier ce qu'il cherche à faire durer.

NOTES ET SOURCES

[1] National Highway Traffic Safety Administration, "How Vehicle Safety Has Improved Over the Decades". La NHTSA estime notamment que le véhicule moyen de 2012 présentait environ 56 % de risque mortel occupant en moins que celui de la fin des années 1950 et attribue plus de 600 000 vies sauvées cumulées aux progrès de sécurité jusqu'en 2012.

[2] Ford Motor Company, Form 10-K 2025, sections Warranty and Field Service Actions. Ford décrit un modèle d'estimation basé sur la nature, la fréquence et le coût des réclamations par ligne et année-modèle ; provision nette d'environ 17,19 Md\$ fin 2025.

[3] General Motors, Form 10-K 2025, Product Warranty and Recall Campaigns. Passif d'environ 13,6 Md\$ fin 2025 et charge annuelle de garantie nette des récupérations fournisseurs d'environ 7,9 Md\$.

[4] Toyota Motor Corporation, Toyota New Global Architecture (TNGA), présentation officielle de l'architecture commune et du « smart sharing ».

[5] Stellantis, "STLA One Global Modular Vehicle Architecture", 21 mai 2026. Objectif déclaré : architecture couvrant plusieurs segments et jusqu'à 70 % de réutilisation de composants sur trois plateformes mondiales à horizon 2030.

[6] Insurance Institute for Highway Safety / Highway Loss Data Institute, "How crash avoidance tech simultaneously raises and slashes repair costs", 11 août 2026. Voir aussi Mueller et al., "Consumer experiences with crash avoidance feature repairs", Journal of Safety Research, 2024.

[7] Règlement (UE) 2018/858, article 61 et annexe X : accès des opérateurs indépendants aux données OBD, outils, logiciels et informations de réparation et d'entretien.

[8] UNECE, règlements ONU n°155 (cybersécurité) et n°156 (mises à jour logicielles et système de gestion des mises à jour).

[9] Thatcham Research, Electric Vehicle Insurability Blueprint, mars 2026 ; recommandations sur diagnostic, carters, supports, pyrofusibles, réparation et remanufacturing des batteries haute tension.

[10] SAE International, J1739_202605, Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) Including Design FMEA, Supplemental FMEA-MSR, and Process FMEA, version stabilisée mai 2026.

[11] INRS, « Habilitation électrique », « Risques liés à l'électricité », et brochure ED 6282 « Réparation et entretien des véhicules automobiles » — NF C 18-550, habilitation selon l'opération, consignation, seuils de tension, risque de court-circuit par chute d'un outil conducteur, organisation et balisage des interventions sur VE/hybrides.

CHAPITRE 3 — L'ÉCONOMIE DU RENOUVELLEMENT ET DU MAINTIEN

OUVERTURE — COMBIEN DE FOIS PEUT-ON VENDRE LA MÊME VOITURE ?

Une voiture quitte l'usine une seule fois. Économiquement, elle peut pourtant être vendue beaucoup plus d'une fois. Le constructeur vend le véhicule neuf. Une société financière prête l'argent nécessaire à son achat ou le loue. Le concessionnaire peut vendre une assurance, une garantie ou un contrat d'entretien. Quelques années plus tard, le véhicule est repris. Il est préparé, revendu à un second propriétaire, parfois refinancé.

Puis viennent les entretiens, les pneus, les plaquettes, la carrosserie, les diagnostics, les pièces de rechange, les réparations. Un moteur ou une boîte peut être remanufacturé. Une batterie peut être réparée. Le véhicule entier peut être reconditionné et revendu encore. À la fin, certaines pièces sont réemployées et les matières restantes rejoignent d'autres circuits. Cette succession change la question économique.

Si nous regardons seulement la première vente, il paraît évident qu'un constructeur gagne davantage lorsque son client remplace souvent sa voiture. Si nous regardons toute la vie de l'objet, la conclusion devient beaucoup moins simple. Le véhicule est au centre d'acteurs dont les intérêts diffèrent. Le constructeur veut vendre du neuf. Sa société financière veut percevoir des intérêts et préserver la valeur des véhicules qu'elle finance ou loue.

Le concessionnaire gagne aussi de l'argent lorsque la voiture revient à l'atelier. Le garage indépendant a besoin d'un parc roulant suffisamment vieux pour avoir besoin de lui. L'assureur voudrait au contraire que les accidents soient rares et les réparations peu coûteuses. Le propriétaire veut que la voiture lui rende son service au coût total le plus faible possible.

Le remanufacturateur a besoin que des composants usagés aient encore assez de valeur pour être reconstruits. La question de ce chapitre est donc moins morale qu'architecturale : où se crée la valeur pendant la vie d'une automobile, qui la capte, et que se passerait-il si le maintien d'un véhicule pendant vingt ans devenait aussi industriellement important que sa première vente ?

1. LE PRIX DE VENTE NE DIT PAS OÙ SE TROUVE LE PROFIT

La première difficulté est comptable. Un chiffre d'affaires impressionnant ne signifie pas nécessairement une forte rentabilité. Vendre une voiture à 35 000 euros produit 35 000 euros de revenu pour la chaîne qui facture la vente. Mais une grande partie de cette somme correspond à des coûts : matériaux, composants, énergie, usine, transport, salaires, garantie, marketing, capital et réseau.

À l'inverse, une activité beaucoup plus petite peut avoir une marge élevée. Cette distinction semble banale. Elle est pourtant essentielle pour comprendre l'automobile. Il faut séparer au moins cinq notions : le chiffre d'affaires, c'est-à-dire ce que l'activité facture ; la marge brute, ce qui reste après le coût directement associé au produit ou au service ; le résultat opérationnel, après les dépenses nécessaires au fonctionnement de l'activité ; le résultat net ou avant impôt ; et enfin le capital qu'il a fallu immobiliser et le risque accepté pour obtenir ce résultat. Deux acteurs peuvent donc gagner leur vie sur la

même voiture de façons presque opposées. L'un a besoin de volume. L'autre a besoin de temps. L'un gagne quand la transaction se produit. L'autre gagne tant que le véhicule continue à circuler. C'est pourquoi parler du « profit de l'industrie automobile » au singulier masque le mécanisme qui nous intéresse.

2. LE CONSTRUCTEUR DEVIENT AUSSI BANQUIER

Ford illustre de manière spectaculaire cette séparation. En 2025, Ford Credit a généré environ 13,27 milliards de dollars de revenus et 2,56 milliards de résultat avant impôt.[1] Ce n'est pas un petit service périphérique attaché à la vente des voitures. Fin 2025, Ford Credit portait environ 146,3 milliards de dollars de créances nettes.[1] Ses revenus comprenaient environ 8,21 milliards de financement, 4,82 milliards de leasing et 164 millions d'assurance.[1] La taille de ces montants change la représentation du constructeur.

Ford n'est pas seulement une entreprise qui transforme acier, aluminium, électronique et travail en véhicules. Le groupe organise aussi une infrastructure de dette. General Motors fournit un second exemple. En 2025, GM Financial a enregistré environ 17,05 milliards de dollars de revenus, à comparer à environ 167,97 milliards de revenus automobiles du groupe.[2] Le chiffre ne signifie pas que la finance serait plus importante que l'industrie.

Il signifie qu'une automobile est désormais assez chère, et son marché assez dépendant du paiement différé, pour qu'un constructeur possède parallèlement une activité financière de très grande taille. La chaîne de montage produit donc deux choses. Elle produit une voiture. Et elle produit un besoin de financement.

3. LE LEASING VEND UNE VALEUR FUTURE

Le crédit classique permet d'acheter aujourd'hui avec des revenus futurs. Le leasing introduit une variable supplémentaire : la valeur future du véhicule lui-même. Le principe économique est simple. Si une voiture vaut 40 000 euros neuve et que le financeur estime qu'elle en vaudra 22 000 à la fin du contrat, le client n'a pas besoin de financer l'équivalent d'une destruction totale de 40 000 euros pendant la période.

Une partie du calcul repose sur les 18 000 euros de valeur consommée, auxquels s'ajoutent financement, frais et autres conditions du contrat. La valeur résiduelle prévue influence donc directement l'économie du leasing. Ally décrit le niveau de sophistication de cette estimation. Son modèle prend en compte notamment l'âge futur, le kilométrage, le segment, le type de véhicule, les conditions économiques, le cycle du produit, les incitations du constructeur et l'offre future de véhicules d'occasion.[3]

Le véhicule est donc vendu aujourd'hui en fonction de ce que le marché pense qu'il vaudra demain. Cette mécanique produit une contradiction intéressante. Une entreprise financière peut gagner davantage si beaucoup de clients louent régulièrement de nouveaux véhicules. Mais elle ne gagne pas pour autant à ce que ces véhicules deviennent rapidement sans valeur. Si la voiture rendue vaut moins que le résiduel prévu, quelqu'un porte la différence.

Le financeur. Ou le constructeur, lorsqu'il a garanti une partie de cette valeur. Ally indiquait fin 2025 que certains de ses contrats de location bénéficiaient précisément de garanties de valeur résiduelle apportées par des constructeurs, particulièrement sur des véhicules électrifiés.[3] La voiture doit

donc être renouvelable sans devenir trop vite indésirable. Le marché demande simultanément nouveauté et permanence de valeur.

4. LE VÉHICULE NEUF A BESOIN DU MARCHÉ D'OCCASION

Cette contradiction explique pourquoi l'occasion n'est pas simplement le concurrent bon marché du neuf. Elle en est aussi une infrastructure. Un propriétaire qui revend sa voiture utilise sa valeur comme apport pour la suivante. Un concessionnaire qui reprend un véhicule neuf de trois ans doit pouvoir le revendre. Une société de leasing doit disposer d'un marché capable d'absorber ses retours.

Un constructeur qui multiplie les remises sur le neuf peut découvrir qu'il dégrade indirectement la valeur des véhicules récents portant déjà sa marque. Cette valeur future revient ensuite dans le calcul du leasing suivant. Le système forme donc une boucle. Une bonne réputation de durabilité peut soutenir la valeur d'occasion. Une forte valeur d'occasion peut soutenir le résiduel.

Un résiduel élevé peut rendre la mensualité de leasing plus attractive. Une mensualité attractive peut soutenir les ventes neuves. Et ces ventes fourniront quelques années plus tard de nouveaux véhicules au marché d'occasion. Le neuf et l'occasion ne sont pas deux mondes séparés. Ils sont deux étages du même marché. Cette observation complique à nouveau l'idée d'une industrie qui voudrait simplement détruire la valeur de ses anciens produits. Une voiture qui ne vaut plus rien trop rapidement peut faciliter son remplacement physique. Elle peut aussi détériorer l'économie financière qui rend le véhicule neuf accessible.

5. LE CONCESSIONNAIRE : LE SHOWROOM N'EST QU'UNE PARTIE DU MÉTIER

La concession révèle encore mieux cette divergence. Aux États-Unis, les données NADA pour 2025 indiquent qu'environ 54,9 % des dollars de ventes des concessionnaires franchisés provenaient des véhicules neufs, 31,8 % de l'occasion et 13,3 % des pièces et services.[4] On pourrait en conclure que l'atelier est secondaire. Ce serait exactement l'erreur que nous venons d'identifier.

Les chiffres qui suivent viennent du marché américain. Ils ne décrivent pas directement la structure française ou européenne ; ils servent ici à rendre visible un mécanisme économique — l'écart possible entre poids dans le chiffre d'affaires et poids dans la marge — qui devra être recontextualisé selon les pays. Ce sont des parts de chiffre d'affaires, pas de profit.

NADA insiste au contraire sur la fonction des « fixed operations » — service et pièces — dans la rentabilité du point de vente. L'organisation enseigne même comme objectif qu'un service après-vente sain puisse couvrir à lui seul l'équivalent de 100 % ou davantage des frais fixes de la concession : le « fixed absorption ».[5] En 2025, les concessionnaires automobiles américains ont écrit plus de 276 millions d'ordres de réparation et dépassé 164 milliards de dollars de ventes de pièces et services selon NADA.[4] Le client qui ne remplace pas sa voiture cette année n'est donc pas nécessairement un client perdu. Il peut revenir pour l'entretenir.

6. ENTREtenir PEUT RAPPORTER DAVANTAGE QUE VENDRE

Un grand groupe de distribution coté permet de voir le phénomène sans confondre revenu et marge. Chez Sonic Automotive, dans le segment des concessions franchisées en

2025, les véhicules neufs ont généré environ 7,04 milliards de dollars de revenus et environ 369 millions de marge brute.[6] Les pièces, le service et la réparation collision n'ont généré qu'environ 1,97 milliard de revenus. Mais leur marge brute dépassait un milliard de dollars.[6] La finance et l'assurance — F&I — apportaient encore environ 571 millions de dollars dans la présentation du groupe.[6] Sonic n'est pas l'ensemble du secteur.

Une entreprise cotée, avec son mix de marques et ses méthodes comptables, n'est pas une moyenne universelle. Mais elle illustre un mécanisme robuste : l'objet vendu dans le showroom peut produire beaucoup de chiffre d'affaires, tandis que sa vie après la vente produit une proportion beaucoup plus grande de marge. Cela change encore le sens du mot « remplacement ». Le vendeur de voitures neuves peut vouloir une transaction nouvelle. Le responsable de l'atelier peut vouloir revoir longtemps la voiture déjà vendue. Ils travaillent dans la même concession.

7. LES INTÉRÊTS NE SONT PAS ALIGNÉS

Nous pouvons maintenant regarder l'automobile comme une coalition plutôt que comme un acteur unique. Le constructeur industriel pense volume, mix produit, prix, utilisation de l'usine et marge par véhicule. La captive financière pense encours, taux, défaut, loyers et valeur résiduelle. Le concessionnaire pense vente neuve, reprise, occasion, F&I, service et pièces. Le garage indépendant pense taille et âge du parc roulant, disponibilité des pièces, accès aux informations et quantité de travail de maintenance.

Le fournisseur peut gagner à la première monte, au marché de remplacement, ou aux deux. L'assureur pense fréquence des accidents multipliée par coût moyen du sinistre. Le premier

propriétaire pense prix, mensualité, fiabilité et valeur de reprise. Le troisième propriétaire pense souvent surtout coût d'entretien et possibilité de réparer. Le remanufacturateur a besoin de composants assez usés pour revenir dans son circuit, mais encore assez précieux pour mériter une reconstruction.

Ces fonctions peuvent converger. Elles peuvent aussi se contredire. Une pièce non démontable peut faire économiser quelques euros à l'usine et augmenter fortement le coût de l'atelier. Un véhicule très fiable peut réduire certaines réparations tout en améliorant sa valeur de revente. Un nouveau modèle très remisé peut soutenir le volume industriel mais faire baisser les résiduels du modèle précédent.

Une voiture techniquement durable peut réduire la fréquence de remplacement du premier propriétaire et augmenter simultanément la durée pendant laquelle le réseau vend de l'entretien. Il n'existe donc pas un intérêt économique automobile. Il existe une distribution des intérêts dans le temps.

8. UNE VOITURE PEUT ÊTRE RENOUVELÉE COMMERCIALEMENT SANS MOURIR

Le chapitre précédent a distingué renouvellement commercial et destruction physique. Nous pouvons maintenant en voir la logique économique. Un client rend un véhicule de trois ans. Il prend le nouveau modèle. L'ancien véhicule est préparé et vendu à un second client. Quatre ou cinq ans plus tard, il peut être revendu de nouveau. La première transaction s'est renouvelée.

L'objet, lui, continue. Le système peut donc produire deux rythmes simultanés : un rythme rapide au sommet du marché ; un rythme beaucoup plus lent dans le parc matériel. C'est un point essentiel. Une industrie peut dépendre d'un flux important

de voitures neuves sans que chaque voiture neuve remplace matériellement une voiture détruite. Le marché de l'occasion distribue les véhicules dans le temps et entre niveaux de revenu.

Il crée une cascade. Cette cascade permet aussi de comprendre pourquoi les flottes, locations et leasings sont importants. Ils mettent sur le marché, après un premier cycle relativement court, des véhicules qui peuvent encore servir longtemps. La question environnementale et matérielle ne peut donc pas être déduite directement du nombre de premières immatriculations. Il faut regarder combien de temps chaque véhicule circule réellement.

9. QUAND LA RÉPARATION CESSE D'ÊTRE RENTABLE

Le chapitre 2 nous a conduit jusqu'à une frontière : la voiture techniquement vivante mais économiquement morte. Ici, nous pouvons ouvrir cette frontière. Pourquoi une réparation de 3 000 euros sauve-t-elle une voiture et en condamne-t-elle une autre ? Parce que la réparation n'est jamais comparée uniquement à la panne. Elle est comparée à la valeur du véhicule, à son risque futur, à son prix de remplacement, à la couverture d'assurance, au coût de la main-d'œuvre, à la disponibilité d'une pièce neuve, d'occasion ou remanufacturée, et à la possibilité de revendre la voiture après l'intervention.

Une architecture difficile à réparer augmente le coût, mais le marché décide ensuite si ce coût mérite d'être payé. Cette distinction explique pourquoi une même panne peut être économiquement insignifiante sur un véhicule récent et terminale sur une voiture de quinze ans.

Elle explique aussi pourquoi le marché des pièces remanufacturées est important. Si le prix d'un organe neuf

devient disproportionné par rapport à la valeur du véhicule, une version remanufacturée nettement moins chère peut rendre la réparation de nouveau rationnelle. La durée de vie du véhicule dépend donc aussi de l'existence d'une économie capable de fournir des réparations adaptées à sa valeur décroissante.

10. LE REMANUFACTURING : L'ÉCONOMIE DU MAINTIEN EXISTE DÉJÀ

Le remanufacturing n'est pas une réparation improvisée. Un composant usagé est récupéré. Il est démonté, nettoyé, inspecté. Les éléments d'usure sont remplacés. Les surfaces nécessaires sont restaurées ou réusinées. Le composant est réassemblé et testé selon un processus industriel. Le résultat revient sur le marché avec une fonction économique différente du neuf : conserver davantage de matière et de valeur déjà produites.

Une étude de CLEPA et Oakdene Hollins évaluait à environ 4,7 milliards d'euros la valeur des pièces automobiles remanufacturées vendues par les fournisseurs européens en 2020.[7] L'étude estimait aussi plus de 800 000 tonnes de CO2 évitées cette année-là selon sa propre méthodologie de comparaison avec des pièces neuves.[7] Le chiffre environnemental dépend des frontières de calcul et doit être lu comme résultat de cette étude sectorielle. Mais le chiffre économique suffit déjà à notre démonstration. Le remanufacturing n'est pas une hypothèse de laboratoire. C'est un marché industriel de plusieurs milliards.

11. RENAULT : TRANSFORMER UNE USINE DU NEUF EN USINE DES SECONDES VIES

Le site de Flins offre presque une expérience grandeur nature de notre question. Pendant des décennies, l'usine

fabrique des voitures neuves. Aujourd'hui, Renault la présente comme une Refactory consacrée à l'économie circulaire de la mobilité.[8] La « Renew Factory » peut traiter jusqu'à 45 000 véhicules d'occasion par an. Elle accepte plusieurs marques. Le processus va de la remise en état jusqu'au contrôle final et aux photographies nécessaires à la recommercialisation.[8]

Ce n'est donc pas un garage agrandi. C'est l'application de méthodes industrielles à la seconde vie. Sur le même site, The Remakers a remanufacturé environ 350 000 pièces en 2025 parmi quelque 11 000 références, selon Renault, avec la même garantie et qualité annoncées que la pièce neuve.[8] Le centre a également reconditionné environ 3 000 batteries électriques ou hybrides en 2025.[8] Ces chiffres sont auto-déclarés par Renault. Ils ne prouvent pas que cette économie soit plus rentable que l'assemblage du neuf. Ils prouvent quelque chose de plus limité mais déjà important : un constructeur sait industrialiser la prolongation de vie. La compétence existe.

12. STELLANTIS : FAIRE DE LA DURÉE UN PORTEFEUILLE DE PRODUITS

Stellantis suit une logique comparable avec SUSTAINera. Le groupe organise ses activités autour de quatre verbes : remanufacturer ; réparer ; réemployer ; recycler.[9] À Mirafiori, le hub d'économie circulaire remanufacture moteurs, boîtes de vitesse et batteries, reconditionne des véhicules et trie des composants destinés à une nouvelle utilisation. Après sa première année, Stellantis déclarait notamment 10 000 moteurs, 10 000 boîtes et 1 000 batteries remanufacturés, 5 000 véhicules reconditionnés et 1,8 million de composants traités.[10] En 2025, le groupe indiquait également avoir étendu à 33 centres son réseau de réparation de batteries haute tension.[9] Là encore, il ne faut pas transformer une stratégie d'entreprise en preuve de

sa réussite économique future. Mais cette stratégie détruit une opposition trop simple. Le même groupe peut vouloir vendre des voitures neuves et chercher simultanément à gagner de l'argent en prolongeant la vie de pièces et de véhicules anciens.

13. VENDRE ENCORE APRÈS LA VENTE : CONTRATS ET LOGICIELS

La relation économique ne s'arrête plus nécessairement lorsque le véhicule quitte le showroom. Ford comptabilisait en 2025 environ 3,51 milliards de dollars de « services and other revenue » hors Ford Credit.[1] Ce poste inclut notamment des contrats de service étendus. Les comptes précisent également que certaines obligations différées peuvent concerner la connectivité du véhicule ou des mises à jour à distance.[1] Mais ce chiffre ne doit pas être rebaptisé « revenu logiciel ».

Il agrège plusieurs activités. Ford déclarait séparément qu'à la fin de 2025 Ford Pro Intelligence comptait environ 840 000 abonnements logiciels payants actifs dans le monde.[11] Cela suffit pour établir une capacité réelle : un constructeur peut continuer à vendre des services pendant la vie du véhicule. Cela ne suffit pas pour conclure que le logiciel est déjà devenu la source principale de profit automobile.

La différence est importante. L'abonnement peut financer une fonction réellement continue : télématique de flotte, navigation enrichie, connectivité, cybersécurité, service à distance. Il peut aussi devenir un moyen de faire payer dans le temps l'accès à une fonction dont le matériel est déjà présent. Économiquement, ces deux situations ne sont pas identiques pour le propriétaire. Pour notre enquête, le point essentiel est ailleurs : la voiture durable peut soutenir des revenus récurrents sans être physiquement remplacée. Le logiciel ajoute donc une nouvelle porte de captation de valeur au cycle de vie.

Il ajoute aussi un nouveau risque de dépendance, que nous retrouverons plus loin.

14. UNE VOITURE DE VINGT-CINQ ANS PEUT-ELLE RESTER UN BON BUSINESS ?

Nous pouvons maintenant revenir à notre expérience de pensée. Imaginons une voiture conçue pour vingt ou vingt-cinq ans, avec une architecture relativement stable, des pièces disponibles longtemps, des modules standardisés, une batterie ou un groupe motopropulseur remplaçable, des mises à niveau possibles et une documentation maintenue. Que perd le constructeur ? Probablement une partie des ventes de remplacement, si les propriétaires conservent réellement leur voiture plus longtemps et si le parc total n'augmente pas.

L'usine peut tourner moins, certains fournisseurs de première monte vendre moins de composants et le capital productif être moins utilisé. Le modèle actuel ne peut donc pas être simplement conservé à l'identique. Mais le même groupe peut déplacer une partie de la valeur vers la maintenance, les pièces, le remanufacturing, les mises à niveau, la réparation de batteries, le rachat et le reconditionnement.

À cela peuvent s'ajouter la certification d'occasion, le financement de plusieurs propriétaires successifs et des contrats de service sur une durée plus longue, voire certains services numériques — à condition qu'ils aient une utilité réelle et qu'ils ne transforment pas la propriété en captivité artificielle. L'économie change alors de point d'ancrage. Au lieu de demander : combien de véhicules neufs peut-on vendre cette année ?

Elle peut demander : combien de valeur peut-on fournir pendant vingt-cinq années de service de ce véhicule ? Rien ne

garantit que le second modèle soit aussi rentable. Mais rien ne permet non plus de conclure qu'il serait économiquement impossible. Renault, Stellantis et l'aftermarket européen montrent déjà certaines briques de ce modèle.

15. LA DURABILITÉ PEUT ELLE-MÊME DEVENIR CAPTIVE

Il faut toutefois résister à une nouvelle simplification. Une économie du maintien n'est pas automatiquement bonne pour le propriétaire. Une entreprise peut prolonger la vie physique d'un véhicule tout en captant de plus en plus de valeur par :

- abonnement ;
- diagnostic propriétaire ;
- pièce exclusivement disponible dans son réseau ;
- contrat obligatoire ;
- activation logicielle ;
- verrouillage d'un module d'occasion.

La voiture dure.

Mais le client dépend. Nous retrouvons alors la distinction du chapitre 2 entre maintenabilité et contrôle de la maintenance. Une automobile de vingt-cinq ans n'est réellement économique pour son utilisateur que si la valeur créée par sa durée n'est pas entièrement absorbée par un monopole sur les moyens de la maintenir. Le droit à la réparation intervient donc aussi ici. Non plus seulement comme droit technique d'accéder à un calculateur. Comme mécanisme de concurrence autour de la valeur future du véhicule.

16. DÉPLACER LA VALEUR DANS LE TEMPS

L'économie automobile n'est pas bâtie autour d'une transaction unique. Elle ressemble davantage à une série de

portes par lesquelles la valeur peut être captée : première vente, crédit, leasing, assurance, reprise, occasion, entretien, réparation, pièce, remanufacturing, reconditionnement, puis enfin réemploi et recyclage. Tous les acteurs ne veulent donc pas la même chose au même moment.

Le constructeur industriel a besoin de volume. Le financeur a besoin de paiements et de résiduels crédibles. Le concessionnaire a besoin de transactions, mais aussi d'un parc qui revient à l'atelier. Le garage indépendant a besoin de véhicules suffisamment longtemps maintenables. Le propriétaire a besoin que la somme de tous ces coûts reste inférieure à la valeur du service reçu.

Cette fragmentation explique pourquoi le système peut simultanément pousser au renouvellement commercial et dépendre de la longévité matérielle. La voiture neuve doit paraître suffisamment nouvelle pour être achetée. La voiture de trois ans doit valoir suffisamment pour être reprise. La voiture de huit ans doit pouvoir être entretenue. La voiture de quinze ans doit disposer de pièces assez abordables pour ne pas mourir économiquement.

Et lorsque certains composants valent encore plus comme organes reconstruits que comme déchets, une nouvelle industrie peut capter cette valeur. La vraie opposition n'est donc pas : profit contre durabilité. Elle est entre différentes manières d'organiser le profit dans le temps. Une industrie orientée vers la durée ne supprimerait pas l'économie automobile. Elle déplacerait la valeur.

Ce déplacement va du remplacement vers le maintien, du premier propriétaire vers plusieurs vies successives, de la pièce neuve vers la pièce reconstruite, et de l'usine uniquement capable de produire vers une usine aussi capable de réparer,

reconditionner et remanufacturer. Le problème devient alors mesurable. Combien de ventes neuves disparaissent ? Combien de valeur de cycle de vie apparaît ? Quel est le coût total pour l'utilisateur ? Quelle quantité de matière neuve est évitée ? Qui possède les interfaces nécessaires à la réparation ? Et surtout : une industrie qui saurait gagner autant à maintenir qu'à remplacer ferait-elle les mêmes choix de conception ?

NOTES ET SOURCES

[1] Ford Motor Company, Annual Report / Form 10-K 2025. Ford Credit : revenus 13,271 Md\$, EBT 2,557 Md\$, créances nettes 146,3 Md\$; ventilation des revenus entre financement, leasing, assurance et services.

[2] General Motors Company, Form 10-K 2025. Revenus automobiles 167,971 Md\$ et revenus GM Financial 17,048 Md\$.

[3] Ally Financial, Form 10-K 2025 et Form 10-Q 2026. Méthode de projection des valeurs résiduelles, exposition au risque de revente et garanties de résiduel sur certains véhicules électrifiés.

[4] National Automobile Dealers Association, NADA Data 2025 Full-Year Report. Répartition du chiffre d'affaires des concessionnaires, volumes de réparation et ventes de pièces/service.

[5] NADA / Dealer Academy, publications sur les fixed operations et le fixed absorption, 2025.

[6] Sonic Automotive, FY2025 results, franchised dealerships segment. Revenus et marges brutes véhicules neufs, occasion, pièces/service/collision et F&I.

[7] CLEPA et Oakdene Hollins, European Remanufacturing Market Study 2021. Valeur du marché européen des pièces remanufacturées en 2020 et estimation sectorielle des émissions évitées.

[8] Renault Group, Refactory Flins, données mises à jour 2025-2026 : Renew Factory, The Remakers, réparation/reconditionnement de batteries.

[9] Stellantis, Annual Report 2025 et page « Extending the Lifespan of Our Products » : stratégie SUSTAINera 4R et réseau de réparation batteries.

[10] Stellantis, SUSTAINera Circular Economy Hub, bilan de première année publié en décembre 2024 : moteurs, boîtes, batteries, véhicules reconditionnés et composants traités.

[11] Ford Motor Company, résultats commerciaux 2025 / Ford Pro Intelligence : environ 840 000 abonnements logiciels payants actifs annoncés fin 2025. Le Form 10-K 2025 agrège par ailleurs contrats de service, connectivité et autres

prestations dans « services and other revenue » ; ces montants ne doivent pas être interprétés comme du revenu logiciel pur.

CHAPITRE 4 — POURQUOI CETTE ÉNERGIE- LÀ ?

OUVERTURE — EN 1900, PERSONNE NE SAVAIT ENCORE QUELLE VOITURE GAGNERAIT

Nous regardons souvent le moteur à essence comme s'il appartenait naturellement à la voiture. Le lien nous paraît presque tautologique. Une voiture ancienne est une voiture à essence. Une station-service vend de l'essence parce que les voitures en consomment. Les raffineries fabriquent du carburant parce qu'il faut alimenter les voitures. Et lorsque nous cherchons une alternative, nous avons tendance à prendre ce système déjà constitué comme point de départ.

L'histoire commence pourtant autrement. Autour de 1900, la voiture n'a pas encore choisi son énergie. Des constructeurs vendent des automobiles à vapeur. D'autres vendent des électriques. D'autres encore travaillent sur le moteur à combustion interne. Chacune possède des avantages. Chacune possède des défauts. Et, surtout, aucune ne se présente encore avec le gigantesque écosystème qui fera plus tard paraître sa technologie évidente.

Le Department of Energy américain rappelle qu'à cette époque les véhicules électriques connaissent un véritable succès urbain. New York exploite une flotte de taxis électriques et, selon le périmètre historique retenu par le DOE, l'électrique représente autour de 1900 environ un tiers des véhicules circulant aux États-Unis.[1] Le Smithsonian décrit la même période comme une compétition réelle entre vapeur, électricité et combustion interne avant qu'un standard automobile

n'émerge.[2] Cette situation nous oblige à modifier notre question. Nous ne demanderons pas seulement : « Quel moteur était le meilleur ? » Nous demanderons : « Quel ensemble moteur, énergie, stockage, infrastructure, industrie et usage a fini par devenir plus cohérent que les autres ? » Car une voiture ne roule jamais avec une énergie abstraite. Elle roule avec un système.

1. TROIS VOITURES POUR UN MÊME PROBLÈME

La vapeur possède au tournant du siècle une immense légitimité technique. Elle propulse déjà des locomotives, des navires et des machines industrielles. Une automobile à vapeur peut être rapide et puissante. Mais transposer une technologie excellente dans une locomotive à une petite machine individuelle n'est pas automatique. Le DOE rappelle que certains véhicules à vapeur demandent un long temps de mise en route, parfois jusqu'à environ quarante-cinq minutes par temps froid, et qu'ils doivent régulièrement refaire leur réserve d'eau.[1]

L'électricité présente presque le profil inverse. Le moteur électrique démarre immédiatement. Il est silencieux. Il ne demande ni manivelle ni changement de vitesse compliqué. Il ne produit pas de fumée d'échappement à l'endroit où circule le véhicule. Pour une ville, ces qualités sont importantes. Mais la batterie impose une autre série de contraintes : coût, masse, autonomie, recharge, entretien et dépendance à un réseau électrique effectivement disponible là où l'on souhaite rouler.

Le moteur à essence, lui, commence avec des défauts évidents. Il est bruyant. Son échappement est désagréable. Il vibre. Il faut le démarrer à la manivelle. La conduite demande davantage de gestes. Mais il emporte un carburant liquide dense, facilement transportable, et permet progressivement

d'aller loin avant ravitaillement. Le Smithsonian insiste sur cette combinaison : autonomie, vitesse, polyvalence et améliorations continues du moteur finissent par rendre la combustion interne très attractive pour les conducteurs qui ne veulent pas seulement traverser une ville mais voyager plus loin.[2] Aucune de ces technologies n'est donc « absurde ». Elles optimisent des choses différentes. Le résultat dépend du monde dans lequel on leur demande de fonctionner.

2. L'ESSENCE GAGNE D'ABORD AUSSI PARCE QU'ELLE EST PRATIQUE

Il serait tentant de raconter la victoire du moteur à essence comme une pure victoire du capital pétrolier. Cette lecture manquerait une partie essentielle du réel. Le carburant liquide possède un avantage pratique considérable pour la mobilité individuelle. Il peut être versé dans un réservoir. Le réservoir peut être relativement petit. L'autonomie est importante. Le plein peut être effectué rapidement.

Le carburant peut être déplacé par wagon, camion, citerne ou canalisation. Le véhicule n'a pas besoin d'être relié en permanence à une infrastructure. Cela compte particulièrement dans une Amérique où l'électrification est d'abord urbaine et où les déplacements ruraux et interurbains deviennent rapidement un marché important. Le véhicule à essence possède donc quelque chose que l'électrique de l'époque ne peut pas facilement reproduire : la possibilité de transporter avec lui une grande quantité d'énergie et de la renouveler rapidement presque partout où un liquide peut être livré. Ce n'est pas encore une station-service moderne. Mais c'est déjà une propriété physique du système qui facilite la construction du réseau. La comparaison contemporaine des carburants du Department of Energy rappelle encore aujourd'hui la différence

entre formes de stockage : essence et diesel sont des liquides à forte énergie volumique, tandis que le gaz naturel doit être comprimé ou liquéfié et que l'hydrogène exige un stockage très différent.[3] Nous ne tirerons pas encore de cette comparaison un bilan d'efficacité. Ce sera le travail du chapitre suivant. Ici, le point est plus simple : la forme physique de l'énergie dessine le véhicule et son infrastructure.

3. LE RÉSEAU CHOISIT AVEC LE MOTEUR

Le cas de l'électricité montre cependant pourquoi il serait tout aussi faux de réduire la victoire de l'essence à ses seules propriétés physiques. En 2021, Josef Taalbi et Hana Nielsen publient dans *Nature Energy* une étude construite à partir d'une base de plus de 36 000 modèles de voitures particulières américaines.[4] Leur question est précisément la nôtre : pourquoi, alors qu'autour de 1900 vapeur, essence et électricité sont encore en concurrence, le moteur à combustion interne prend-il si rapidement l'avantage ? Leur résultat donne un poids important à l'infrastructure.

La diffusion lente de l'électricité limite géographiquement les constructeurs et les utilisateurs de véhicules électriques. Les auteurs construisent ensuite un contrefactuel. Selon leur modèle, une diffusion du réseau électrique quinze ou vingt ans plus tôt aurait pu faire basculer le choix technologique en faveur de l'électricité dans de nombreuses zones, surtout métropolitaines.[4] Il ne faut pas transformer ce résultat en histoire alternative certaine.

Un modèle contrefactuel ne prouve pas que toute l'Amérique aurait roulé électrique. Mais il détruit une explication trop simple. La batterie n'a pas perdu seulement parce qu'elle était une mauvaise batterie. Elle a aussi perdu dans un environnement où l'électricité nécessaire pour l'utiliser était

distribuée de manière inégale. Une technologie peut donc être performante localement et perdre nationalement parce que son réseau ne suit pas.

4. UNE TECHNOLOGIE PEUT VOLER LES AVANTAGES DE SA RIVALE

L'autre erreur consiste à imaginer que les technologies restent figées pendant qu'elles se concurrencent. L'électrique possède au départ un avantage évident : il démarre immédiatement. Le thermique exige une manivelle. Puis arrive le démarreur électrique. En 1912, Charles Kettering introduit un système qui supprime une grande partie de cette pénibilité. Le DOE et le Smithsonian soulignent tous deux le rôle de cette innovation dans l'amélioration de l'usage du moteur à essence. [1][2]

Le moteur thermique emprunte littéralement un avantage au monde électrique. Même chose pour l'éclairage. La batterie et les composants électriques deviennent progressivement indispensables dans une voiture à essence. Cette hybridation technique est importante. Lorsqu'une technologie gagne, elle ne gagne pas nécessairement en conservant son identité originelle. Elle peut absorber les fonctions qui rendaient ses concurrentes séduisantes.

Le « moteur à essence » qui domine quelques décennies plus tard est déjà un système électromécanique : il utilise une batterie, un démarreur, un alternateur, des composants d'allumage, puis de plus en plus d'électronique. L'histoire technologique ne ressemble pas à trois espèces pures dont une éliminerait les deux autres. Elle ressemble davantage à une compétition au cours de laquelle les architectures s'observent, se copient et déplacent leurs faiblesses.

5. FORD NE PRODUIT PAS SEULEMENT PLUS DE VOITURES : IL RENFORCE UNE FILIÈRE ÉNERGÉTIQUE

Nous avons déjà étudié au chapitre 1 la boucle industrielle créée par Ford : standardisation, productivité, baisse du prix, hausse du volume, puis nouvelle productivité. Cette boucle possède maintenant une conséquence supplémentaire : elle sélectionne aussi une filière énergétique. Le DOE donne un ordre de grandeur spectaculaire : en 1912, son exemple historique place la voiture à essence à environ 650 dollars contre 1 750 dollars pour un roadster électrique.[1]

Le détail exact varie évidemment selon le modèle comparé. Mais la direction du changement est claire. Lorsque le Model T rend la voiture à essence accessible à un marché beaucoup plus large, chaque véhicule vendu augmente simultanément : la demande de carburant ; l'intérêt d'ouvrir des points de vente ; le nombre de mécaniciens apprenant à réparer ces moteurs ; la quantité de pièces produites ; les données accumulées sur les pannes ; les capacités industrielles dédiées ; la recherche sur la combustion interne.

À partir de là, la compétition n'oppose plus seulement deux voitures. Elle oppose un véhicule électrique à un système thermique dont chaque million d'unités produit de nouvelles raisons d'en fabriquer le million suivant. C'est ici qu'apparaît la dépendance au sentier. Pas comme une malédiction abstraite. Comme une accumulation concrète.

6. LE PÉTROLE APPREND À SERVIR LA VOITURE, LA VOITURE APPREND À CONSOMMER LE PÉTROLE

L'essence elle-même possède une histoire paradoxale. L'Energy Information Administration rappelle qu'aux débuts de l'industrie pétrolière américaine, le produit recherché est notamment le kérosène pour l'éclairage. L'essence produite

pendant la distillation n'a pas encore son immense marché automobile. Elle est même, dans certaines situations, un produit peu valorisé.[5] Puis la voiture crée la demande. L'EIA indique qu'en 1920 environ neuf millions de véhicules à essence circulent déjà aux États-Unis et que les stations-service se multiplient.[5]

L'automobile transforme donc un produit du raffinage en marchandise stratégique. Et cette nouvelle marchandise transforme à son tour l'automobile. L'industrie pétrolière améliore raffinage, formulation, stockage et distribution. Le réseau de vente devient plus dense. Le conducteur peut compter sur le ravitaillement. Le véhicule peut donc être utilisé plus loin. Cette nouvelle utilité crée davantage de demande.

Nous retrouvons la même boucle que chez Ford, mais à une autre échelle. La voiture fait la station. La station fait la voiture plus pratique. La voiture justifie la raffinerie. La raffinerie produit un carburant mieux adapté au moteur. Il devient alors difficile de dire où finit l'innovation automobile et où commence l'innovation énergétique.

7. LE CARBURANT DEVIENT LUI-MÊME UNE TECHNOLOGIE

Un moteur à essence ne fonctionne pas avec « de l'essence » comme substance immuable. Le carburant est formulé. Ses propriétés changent. Et certaines transformations du moteur deviennent possibles parce que le carburant change avec lui. Le cliquetis en donne un exemple majeur. Augmenter la compression peut améliorer puissance et rendement. Mais cela augmente le risque de combustion anormale avec certains carburants.

Dans les laboratoires de General Motors, Charles Kettering, Thomas Midgley et leurs collègues cherchent donc des solutions

antidétonantes. En 1921, ils identifient l'efficacité du tétraéthylplomb. L'EPA rappelle que l'additif entre commercialement dans l'essence dès les années 1920 et permet le développement de moteurs à compression plus élevée.[6] Le point important n'est pas seulement que le plomb « améliore l'essence ». Il modifie la trajectoire moteur-carburant. Un choix chimique effectué dans la raffinerie autorise un autre choix géométrique dans le cylindre. Nous ne sommes plus face à un carburant alimentant une machine. Nous sommes face à deux technologies co-conçues.

8. LE PLOMB N'ÉTAIT PAS LA SEULE PORTE

L'histoire devient plus intéressante lorsque l'on regarde ce qui n'a pas été choisi. Les équipes de Kettering et Midgley testent de nombreuses substances : iode, aniline, composés du sélénium et du tellure, benzène, alcool et tétraéthylplomb. L'histoire technique publiée par Dietmar Seyferth dans *Organometallics* rappelle que l'éthanol possède lui aussi d'excellentes propriétés antidétonantes.[7] Mais la comparaison n'est pas simplement « poison contre carburant propre ».

Le tétraéthylplomb fonctionne à très faible concentration. L'éthanol doit être mélangé en proportion beaucoup plus élevée. Cela signifie davantage de matière à produire, transporter et distribuer. Dans les États-Unis des années 1920, l'approvisionnement industriel en alcool, son coût et le contexte de la prohibition compliquent encore le choix.[7] Un travail historique de Bill Kovarik à partir d'archives de General Motors montre par ailleurs que l'éthanol et d'autres carburants alternatifs sont réellement étudiés par Kettering et Midgley ; le récit selon lequel aucune autre piste n'existait est donc trop simple.[8]

Mais l'erreur inverse le serait aussi. L'existence d'une alternative chimique ne prouve pas qu'elle pouvait immédiatement remplacer la filière pétrolière à la même échelle et au même coût. La question pertinente devient : pourquoi une solution qui demande quelques grammes par gallon a-t-elle gagné sur une solution qui demande des dizaines de pourcents du volume ? Cette question mêle chimie, propriété industrielle, logistique, approvisionnement, réglementation et économie. C'est précisément ce que nous cherchons.

9. UNE SOLUTION PEUT RÉUSSIR LOCALEMENT ET DÉPLACER SES COÛTS AILLEURS

Le plomb résout efficacement un problème réel du moteur. Cela ne transforme pas son bilan en réussite générale. La toxicité du tétraéthylplomb apparaît très tôt dans sa fabrication. L'EPA documente les intoxications et décès d'ouvriers dans les années 1920, les controverses sanitaires, puis des décennies plus tard le retrait progressif du plomb de l'essence.[6]

Le choix est intéressant parce qu'il oblige à séparer les échelles. Pour le moteur : moins de cliquetis ; davantage de possibilités de compression ; meilleures performances. Pour le système sanitaire : exposition professionnelle ; émissions de plomb ; contamination environnementale ; coûts diffus à long terme. Une technologie peut donc résoudre un problème local en déplaçant le coût vers une autre partie du réel.

Cela ne prouve pas une intention de nuire. Cela montre plutôt pourquoi une fonction d'optimisation trop étroite peut devenir dangereuse. Le moteur demande : « Comment empêcher le cliquetis ? » La société doit demander en plus : « Que devient la solution une fois produite à des milliards de litres ? »

10. LE DIESEL FRANÇAIS : QUAND LA TECHNIQUE ET LE PRIX POLITIQUE CONVERGENT

Il serait pourtant faux de déduire de l'exemple du plomb que les choix énergétiques ne sont qu'une suite d'externalités cachées. Le diesel possède un véritable avantage technique. IFP Energies Nouvelles indique, pour des moteurs automobiles modernes dans leurs points de fonctionnement les plus favorables, un rendement maximal de l'ordre de 42 % pour un Diesel contre environ 36 % pour un moteur à essence.[9] Ces chiffres ne décrivent pas la consommation réelle de chaque voiture sur chaque trajet.

Nous les utiliserons plus tard avec davantage de prudence. Ici, ils suffisent à établir que le diesel n'est pas une convention arbitraire. Il offre une efficacité et des caractéristiques adaptées aux forts kilométrages et aux usages lourds. Mais pourquoi la France a-t-elle poussé cette motorisation aussi loin dans la voiture particulière ? Parce qu'une deuxième variable se superpose.

La fiscalité. Une réponse officielle du ministère de l'Écologie publiée au Sénat en 2014 explique que le gazole bénéficiait historiquement d'une fiscalité préférentielle liée à son usage majoritairement professionnel, et que cet avantage a incité les constructeurs — notamment français — à développer le diesel dans les voitures particulières.[10] La Cour des comptes écrit en 2024 que, depuis les années 1980, le différentiel de taxation entre gazole et essence a contribué à la diésélisation du parc. [11] Le mécanisme est puissant. Un carburant moins taxé réduit le coût kilométrique perçu.

À mesure que le client choisit davantage de diesel, le constructeur y investit davantage, les moteurs progressent, le réseau de garages se forme et le marché de l'occasion se remplit.

La technologie devient ainsi encore plus crédible pour l'acheteur suivant. La fiscalité ne crée pas le moteur ; elle modifie la pente sur laquelle la technologie apprend.

11. L'ÉTAT NE CHOISIT PAS SEUL, LE MARCHÉ NON PLUS

Le diesel français fournit donc un antidote à deux récits opposés. Premier récit : « Le marché choisit spontanément la technologie la plus efficace. » Ce n'est pas suffisant. Le prix payé par l'utilisateur dépend de taxes, normes et choix collectifs. Deuxième récit : « L'État décide de la technologie et les consommateurs suivent. » Ce n'est pas suffisant non plus. Un signal fiscal n'aurait pas créé vingt ans de diesel particulier s'il n'existait pas de moteurs performants, de constructeurs capables de les produire, de clients trouvant avantage à leur autonomie et de marchés où leurs coûts d'usage paraissaient compétitifs.

La trajectoire est relationnelle : technique et institution s'interlient, et l'une modifie le rendement de l'autre. Cette observation sera importante lorsque nous aborderons l'électrique contemporain. Une norme ou une subvention peut accélérer un marché, mais elle ne remplace pas indéfiniment une technologie qui ne satisfait pas l'usage.

12. L'ÉTHANOL BRÉSILIEN : CONSTRUIRE UN AUTRE SENTIER

Le Brésil fournit presque l'expérience inverse. Au lieu de demander pourquoi un carburant pétrolier particulier domine à l'intérieur d'un système déjà pétrolier, il demande comment construire un véritable concurrent au pétrole. Le Proálcool est créé en 1975 dans le contexte du choc pétrolier.[12] Le programme ne se contente pas de demander aux automobilistes de « choisir l'éthanol ».

Il faut développer : la production agricole ; les distilleries ; le stockage ; la distribution ; la formulation des carburants ; les moteurs ; les prix ; les règles. Le Brésil possède en outre un avantage particulier : une industrie sucrière et une ressource de canne à sucre déjà massives. Le BNDES décrit l'importance du soutien financier, des obligations de mélange, du développement des véhicules à éthanol et du rôle de l'infrastructure de stockage et de distribution dans la constitution de la filière.[13] La leçon est considérable. Une alternative énergétique n'est pas seulement découverte. Elle peut être construite.

13. MAIS UNE FILIÈRE CONSTRUITE PEUT AUSSI SE FRAGILISER

Le Proálcool connaît pourtant une crise. Lorsque le prix du pétrole baisse, que le sucre redevient plus attractif et que l'approvisionnement en éthanol devient incertain, la confiance des consommateurs diminue. Les sources brésiliennes décrivent la pénurie de la fin des années 1980 et la stagnation qui suit.[13] Cela montre que la décision publique ne suffit pas à rendre un sentier irréversible.

Une filière doit continuer à offrir une combinaison acceptable de prix, de disponibilité, de fiabilité et de commodité. Sinon, le consommateur réévalue le risque. Le retournement suivant est particulièrement instructif. En 2003 apparaît massivement au Brésil le moteur flex-fuel, capable d'utiliser essence et éthanol dans des proportions variables.[14] Le véhicule ne demande plus à son propriétaire de prévoir quel carburant sera disponible ou avantageux plusieurs années plus tard.

Il lui donne une option. Le choix énergétique devient réversible à chaque plein. Cette flexibilité réduit un risque que les politiques de soutien seules n'avaient pas supprimé. C'est

peut-être l'une des innovations les plus importantes du système brésilien : ne pas seulement améliorer un carburant, mais réduire le coût d'une erreur de choix.

14. « ÉTHANOL » NE DÉSIGNE PAS UNE SEULE FILIÈRE

L'exemple brésilien peut à son tour devenir trompeur si nous généralisons trop vite. L'éthanol est une molécule, mais son système de production peut être radicalement différent selon qu'il vient du maïs, de la betterave, de la canne à sucre ou de résidus lignocellulosiques. Chacun mobilise d'autres rendements agricoles, coproduits, besoins énergétiques, infrastructures et usages du sol. La littérature sur la canne brésilienne lui attribue généralement un bilan énergétique plus favorable que celui de plusieurs autres biocarburants de première génération.[15]

Une raison importante est que la bagasse issue de la canne peut fournir une partie de la chaleur et de l'électricité nécessaires au procédé. Mais quantifier cet avantage exige de choisir des frontières de calcul : énergie agricole, transformation, coproduits, transport et rendement des cultures. Ces comparaisons chiffrées appartiennent au chapitre 5. Ici, nous retiendrons seulement une règle : on ne choisit jamais « un biocarburant ». On choisit une chaîne de production complète.

15. GAZ NATUREL ET GPL : LE STOCKAGE FAIT UNE PARTIE DU DESTIN

Le gaz naturel fonctionne très bien dans un moteur adapté. Le Department of Energy souligne que les performances de véhicules au gaz naturel peuvent être proches de celles de véhicules conventionnels.[16] Pourquoi ne remplacent-ils alors pas massivement l'essence ? En partie parce que leur stockage

modifie le véhicule. Le gaz naturel comprimé exige des réservoirs haute pression.

À espace embarqué comparable, son autonomie est généralement plus faible. Le gaz naturel liquéfié améliore la densité de stockage mais ajoute les contraintes d'un liquide cryogénique.[16] Le propane offre une autre combinaison. Il peut être stocké comme liquide sous pression et son infrastructure de distribution peut s'installer à côté de pompes à carburants conventionnels.[17] Ces exemples sont utiles parce qu'ils empêchent une obsession du moteur. Le moteur peut être excellent. Le carburant peut être bon marché. Et malgré cela, le réservoir ou la station peuvent décider du marché.

16. LE GAZOGÈNE : « ÇA MARCHE » N'EST PAS ENCORE UNE POLITIQUE DE MOBILITÉ

Le gazogène est un excellent test de notre méthode. La technologie est réelle. Bois ou charbon de bois sont gazéifiés. Le gaz produit alimente un moteur à combustion interne. La FAO documente les adaptations nécessaires et estime que, sur un moteur essence atmosphérique correctement converti, la perte de puissance maximale peut être limitée à environ 30 %.[18]

Nous sommes loin d'une machine impossible. Mais regardons le système entier : il faut un gazogène volumineux, du combustible solide, une mise en route, une filtration suffisante des poussières et goudrons, de l'entretien, une gestion attentive du monoxyde de carbone et l'acceptation d'une puissance moindre. Dans une guerre ou une pénurie de pétrole, ces coûts peuvent être acceptables.

Sur une exploitation agricole disposant de biomasse, ils peuvent parfois avoir du sens. Pour une voiture particulière moderne utilisée sans compétence technique particulière, ils

deviennent beaucoup plus lourds. Le gazogène n'a donc pas besoin d'avoir été « supprimé » pour rester marginal. Il suffit que son ensemble de contraintes soit moins adapté au programme d'usage dominant.

17. L'EAU DANS LE MOTEUR : SÉPARER LE PHÉNOMÈNE RÉEL DU RÉCIT EXTRAORDINAIRE

L'injection d'eau offre un autre piège. Une personne entend : « de l'eau peut réduire la consommation d'un moteur ». Elle en déduit : « un moteur peut rouler à l'eau ». Ce ne sont pas les mêmes propositions. La littérature scientifique sur les moteurs à essence turbo montre un rôle réel de l'injection d'eau. En refroidissant la charge, elle peut réduire le cliquetis, diminuer certaines limitations thermiques et éviter dans certaines zones de fonctionnement l'enrichissement en carburant utilisé pour protéger les composants.

Une étude SAE de 2019 impliquant notamment IFPEN, Renault, PSA et Magneti Marelli rapporte, dans sa configuration expérimentale, des réductions de consommation pouvant atteindre environ 13 % dans certaines conditions à forte charge. [19] L'eau n'est pas le combustible. Elle modifie les conditions dans lesquelles le combustible brûle. Cette précision nous permet ensuite de regarder le système Gillier-Pantone sans moquerie et sans crédulité.

Un projet étudiant mené à l'École des Mines de Douai, avec essais au CRITT M2A, a tenté de caractériser expérimentalement le procédé.[20] Le rapport disponible ne confirme pas les performances extraordinaires revendiquées. Mais il ne s'agit pas d'une publication évaluée par les pairs et il ne peut pas, à lui seul, régler la question générale. Sa valeur ici est méthodologique : montrer ce que devient une affirmation inhabituelle lorsqu'on la confronte à un banc d'essais plutôt

qu'à des témoignages. Une technologie inhabituelle doit être testée au banc, avec des mesures de charge, de consommation, de puissance et de polluants, ainsi qu'une comparaison reproductible. L'anecdote ne suffit ni à condamner ni à valider.

18. LE RETOUR DE L'ÉLECTRIQUE : UN VERROUILLAGE PEUT ÊTRE ROUVERT

Si la dépendance au sentier était absolue, la voiture électrique n'aurait jamais pu revenir. Elle revient pourtant. Non parce que l'histoire aurait soudain reconnu son erreur de 1900. Parce que le système change. La batterie lithium-ion offre des performances radicalement différentes des accumulateurs du début du siècle. L'électronique de puissance progresse. Les moteurs électriques sont pilotés avec précision.

Les infrastructures de recharge se développent. Les normes de CO2 et de pollution modifient l'économie relative des technologies. De nouveaux industriels entrent dans le marché. Les capacités mondiales de fabrication de batteries atteignent une échelle gigantesque. L'IEA indique qu'en 2025 les voitures électriques ont représenté 25 % des ventes de voitures neuves dans le monde, tandis que le prix moyen des batteries a encore diminué d'environ 8 % cette année-là.[21]

Ce résultat ne prouve pas que l'électrique a désormais « gagné ». Il montre autre chose : les rendements croissants de l'ancien système peuvent être combattus par ceux du nouveau, à mesure que se développent les usines de cellules, les standards de recharge, les réseaux de bornes, les compétences, les volumes et le marché de l'occasion. Plus cette infrastructure grandit, moins chaque voiture électrique suivante doit inventer son monde seule.

19. LE PROBLÈME DE L'ŒUF ET DE LA POULE N'A PAS DISPARU

La recharge reste cependant une démonstration parfaite de l'effet de réseau. Pourquoi acheter une voiture électrique si les bornes sont rares ? Pourquoi installer des bornes si les voitures électriques sont rares ? Des travaux sur les municipalités norvégiennes trouvent précisément des relations non linéaires entre stock de bornes et adoption des véhicules électriques, compatibles avec des effets de réseau et le problème de l'infrastructure initiale.[22]

Cela nous ramène à 1900. Une technologie peut être prisonnière de son petit nombre. Mais les sociétés contemporaines possèdent un avantage que les premiers constructeurs électriques avaient beaucoup moins : elles savent que le problème existe. Elles peuvent décider de surinvestir au début. L'État peut cofinancer. Un constructeur peut déployer son propre réseau. Un opérateur peut accepter une rentabilité faible pendant la phase de démarrage. Une norme commune peut réduire le risque. La dépendance au sentier n'est donc pas seulement un obstacle. Une fois comprise, elle devient aussi un objet d'action.

20. L'HYDROGÈNE : UNE VOITURE RAPIDE À RAVITAILLER PEUT AVOIR UNE INFRASTRUCTURE TRÈS LENTE À CONSTRUIRE

L'hydrogène semble résoudre l'un des reproches classiques adressés à la batterie. Un véhicule à pile à combustible peut offrir une grande autonomie et être ravitaillé rapidement. Mais le Department of Energy identifie toujours le stockage dense à bord comme une difficulté majeure.[23] Pour atteindre une autonomie compétitive, les véhicules légers utilisent aujourd'hui des réservoirs de gaz à très haute pression.

Puis vient le deuxième problème. La station. Le réseau de distribution d'hydrogène reste limité et concentré dans

quelques marchés. L'Alternative Fuels Data Center du DOE indique explicitement que la disponibilité de stations à prix raisonnable, là où les véhicules sont déployés, reste un défi majeur.[24] Nous obtenons alors un paradoxe. Le conducteur peut effectuer un plein rapidement. Mais la société doit construire une nouvelle filière de production, transport, stockage, compression et distribution avant que ce plein devienne banal. Le temps de l'utilisateur n'est pas le temps du système.

21. LA DÉPENDANCE AU SENTIER N'EST PAS LE DESTIN

Nous pouvons maintenant donner un sens plus précis au terme « dépendance au sentier ». Ce n'est pas : « la première technologie arrivée gagne pour toujours ». Ce n'est pas non plus : « la meilleure technologie gagne automatiquement ». C'est un mécanisme par lequel les choix passés modifient le coût et l'intérêt des choix futurs. Une usine thermique forme des ingénieurs thermiques.

Ces ingénieurs déposent des brevets thermiques. Les fournisseurs investissent dans les composants thermiques. Les stations distribuent le carburant thermique. Les consommateurs apprennent son usage. Les réglementations se construisent autour de lui. Chaque couche rend la suivante plus probable. Des travaux économiques sur les brevets automobiles montrent d'ailleurs que l'innovation propre ou carbonée dépend elle-même de l'histoire d'innovation de l'entreprise et des connaissances accumulées dans son environnement.[25]

Mais une trajectoire peut être déplacée. Le diesel français l'a été par la modification des signaux fiscaux et réglementaires. Le Brésil a construit un marché de l'éthanol. L'électrique revient grâce à une nouvelle constellation technique, réglementaire et industrielle. Le sentier est donc une pente. Pas un mur.

22. NOUS NE CHOISSONS JAMAIS SEULEMENT UN MOTEUR

La question du chapitre était : pourquoi cette énergie-là ? Nous pouvons maintenant répondre sans invoquer une cause unique. Une filière gagne lorsqu'un ensemble devient suffisamment cohérent : la ressource existe, le vecteur peut être stocké, le véhicule l'utilise correctement, le coût devient acceptable, l'infrastructure atteint une densité suffisante, les industriels savent produire, les réparateurs savent maintenir et les standards réduisent les incompatibilités.

Les règles publiques ne rendent pas le choix prohibitif. L'utilisateur trouve l'expérience suffisamment pratique. Puis chaque nouvelle adoption renforce certains de ces éléments. Le moteur à essence possédait de vrais avantages pour la mobilité individuelle du début du XXe siècle. La production de masse a amplifié ces avantages. Le pétrole a trouvé dans l'automobile un débouché immense.

La station-service a rendu la voiture plus libre. La voiture a rendu la station plus rentable. Le carburant a été reformulé pour permettre d'autres moteurs. Les compétences et les capitaux se sont accumulés. C'est cela, plus que la victoire d'une machine isolée, qui a rendu le système dominant. Mais le même cadre explique aussi ses rivaux.

Le diesel français montre qu'un avantage de rendement peut être renforcé par la fiscalité. Le Brésil montre qu'un autre carburant peut devenir crédible si toute une infrastructure est construite autour de lui. Le gazogène montre qu'une technologie techniquement réelle peut rester trop contraignante pour l'usage dominant. L'injection d'eau montre qu'un phénomène véritable peut être entouré d'interprétations beaucoup plus fortes que les données.

L'électricité montre qu'une trajectoire abandonnée peut revenir lorsque son écosystème change. L'hydrogène rappelle que résoudre le véhicule ne résout pas nécessairement la station. Nous ne choisissons donc jamais seulement une énergie : nous choisissons, consciemment ou non, un ensemble d'engagements matériels — réservoirs, usines, raffineries, réseaux électriques, stations, normes, taxes, compétences, mines, cultures agricoles, logiciels et habitudes. Une fois matérialisés, ces choix deviennent les conditions du choix suivant.

Le chapitre prochain devra alors poser une autre question. Une fois la filière choisie, que fait réellement l'énergie que nous y introduisons ? Combien atteint les roues ? Combien est dissipé ? Que change la masse ? Que change la vitesse ? Que signifie vraiment « économiser du carburant » lorsqu'on suit l'énergie plutôt que le prix à la pompe ? Ce ne sera plus l'histoire du choix. Ce sera l'anatomie de l'usage.

NOTES ET SOURCES

- [1] U.S. Department of Energy, « The History of the Electric Car », 2014.
- [2] Smithsonian National Museum of American History, « Technological Choices », *America on the Move*.
- [3] U.S. Department of Energy, Alternative Fuels Data Center, « Fuel Properties Comparison ».
- [4] Josef Taalbi & Hana Nielsen, « The role of energy infrastructure in shaping early adoption of electric and gasoline cars », *Nature Energy*, 2021.
- [5] U.S. Energy Information Administration, « History of gasoline ».
- [6] U.S. Environmental Protection Agency, « Lead Poisoning: A Historical Perspective ».
- [7] Dietmar Seyferth, « The Rise and Fall of Tetraethyllead », *Organometallics*, 2003.
- [8] Bill Kovarik, « Charles F. Kettering and the Development of Tetraethyl Lead in the Context of Alternative Fuel Technologies », SAE, 1994.
- [9] IFP Energies Nouvelles, « Les véhicules essence et Diesel ».

- [10] Sénat / réponse du ministère de l'Écologie, « Fiscalité du gazole », réponse publiée en 2014.
- [11] Cour des comptes, « La place de la fiscalité de l'énergie dans la politique énergétique et climatique française », 2024.
- [12] Brésil, Decreto n° 76.593 de 1975 instituant le Programa Nacional do Alcool.
- [13] BNDES, analyses historiques et perspectives du secteur brésilien de l'éthanol.
- [14] Empresa de Pesquisa Energética et Ministério de Minas e Energia, histoire du flex-fuel brésilien.
- [15] Littérature de synthèse sur l'éthanol de canne brésilien ; avantage énergétique généralement favorable mais dépendant des frontières méthodologiques, approfondi au chapitre 5.
- [16] U.S. Department of Energy, Alternative Fuels Data Center, « Natural Gas Vehicles ».
- [17] U.S. Department of Energy, Alternative Fuels Data Center, « Propane Fueling Stations ».
- [18] FAO, « Wood gas as engine fuel — Fuelling of engines by producer gas ».
- [19] Cordier et al., « Water Injection to Improve Direct Injection Spark Ignition Engine Efficiency », SAE Technical Paper 2019-01-1139.
- [20] École des Mines de Douai / CRITT M2A, rapport expérimental sur le système Gillier-Pantone.
- [21] International Energy Agency, Global EV Outlook 2026.
- [22] van Dijk, Delacrétaz & Lanz, « Technology Adoption and Early Network Infrastructure Provision in the Market for Electric Vehicles », Environmental and Resource Economics, 2022.
- [23] U.S. Department of Energy, « Hydrogen Storage ».
- [24] U.S. Department of Energy, Alternative Fuels Data Center, « Hydrogen Fueling Stations ».
- [25] Aghion et al., « Carbon Taxes, Path Dependency, and Directed Technical Change: Evidence from the Auto Industry », Journal of Political Economy, 2016.

CHAPITRE 5 — OÙ VA L'ÉNERGIE QUAND ON CONDUIT ?

OUVERTURE — L'ÉNERGIE QUE LE COMPTEUR NE MONTRE PAS

Le conducteur voit une vitesse. Il voit parfois une consommation instantanée. Dans un véhicule électrique, il peut aussi voir une puissance demandée ou une énergie récupérée. Mais aucun de ces nombres, pris seul, ne montre réellement ce que la voiture est en train de faire avec son énergie. À vitesse constante, le véhicule doit continuer à fournir de la puissance pour vaincre l'air, les pneus, les roulements, la transmission et les auxiliaires.

Quand il accélère, il stocke une partie de l'énergie dans sa propre vitesse. Quand il monte, il la stocke dans l'altitude. Quand il freine, cette énergie doit quitter le mouvement. Elle devient chaleur. Ou, sur un hybride et un électrique, elle peut être partiellement reconvertie en électricité. Cette simple description suffit à corriger plusieurs intuitions. Une voiture qui consomme « zéro » en frein moteur peut tout de même être en train de détruire de l'énergie cinétique.

Une voiture qui récupère beaucoup au freinage peut avoir gaspillé beaucoup juste avant en accélérant trop. Une voiture lourde peut être peu pénalisée sur une autoroute parfaitement plane et davantage pénalisée en ville ou en montagne. Et rouler plus vite peut coûter énergétiquement de plus en plus cher alors que le temps gagné par kilomètre supplémentaire devient de plus en plus faible. Le chapitre précédent demandait pourquoi une filière énergétique avait gagné. Ici, nous suivons l'énergie elle-même.

1. UNE VOITURE CONSOMME MÊME QUAND SA VITESSE NE CHANGE PAS

Imaginons une voiture roulant à vitesse parfaitement constante sur une route parfaitement plane. Elle n'accélère pas. Elle ne monte pas. Son énergie cinétique ne change donc pas. Pourquoi faut-il encore appuyer sur l'accélérateur ? Parce que le mouvement rencontre des résistances. La première vient des pneus et des déformations du contact avec la route. C'est la résistance au roulement.

Elle dépend notamment du poids, du pneu, de sa pression, de sa température et du revêtement. La seconde est l'air. La voiture doit continuellement déplacer l'atmosphère qui se trouve devant elle. La force aérodynamique augmente approximativement avec le carré de la vitesse relative à l'air. Comme la puissance est une force multipliée par une vitesse, la puissance nécessaire pour vaincre cette traînée augmente approximativement avec le cube de la vitesse.

Le Department of Energy résume cette différence de régime : à faible vitesse, le roulement pèse davantage ; à vitesse élevée, l'aérodynamique devient dominante.[1] C'est pourquoi un trajet autoroutier rapide ne ressemble pas énergétiquement au même trajet à 50 km/h. La voiture n'avance pas simplement « un peu plus vite ». Elle travaille dans un autre régime de pertes.

2. POURQUOI VINGT KILOMÈTRES-HEURE DE PLUS COÛTENT PLUS QUE VINGT KILOMÈTRES-HEURE

L'intuition humaine traite facilement la vitesse comme une quantité linéaire. 110. 130. La différence est vingt. Mais l'air ne réagit pas à cette différence comme un compteur kilométrique. À forme de véhicule identique, la force de traînée à 130 km/h est environ 40 % plus élevée qu'à 110 km/h, simplement parce qu'elle dépend approximativement du carré de la vitesse.

La puissance aérodynamique nécessaire croît encore plus vite, puisqu'elle dépend approximativement du cube. Cela ne signifie pas que la consommation totale augmente exactement au cube. Le moteur, la transmission, les pneus, la pente et les auxiliaires ajoutent d'autres termes. Mais la tendance physique est claire. Les essais compilés par Oak Ridge National Laboratory montrent effectivement une dégradation marquée de l'économie de carburant lorsque la vitesse autoroutière augmente. Sur la série de véhicules 2003-2012 reprise dans le Transportation Energy Data Book, la perte mesurée entre 60 et 70 mph se situe autour d'une dizaine de pourcents ou davantage selon le véhicule.[2]

Ce n'est pas une constante universelle. Une berline basse et aérodynamique, un SUV, une camionnette et une voiture électrique ne réagiront pas de la même manière. Mais aucun ne négocie avec la formule de la traînée. Plus la vitesse augmente, plus l'air devient un poste majeur du budget énergétique.

3. QUEL TEMPS ACHÈTE RÉELLEMENT LA VITESSE ?

Le coût énergétique de la vitesse n'a de sens que si nous regardons ce qu'elle achète. Sur une route théorique de 100 kilomètres parcourue sans ralentissement : à 80 km/h, il faut 75 minutes ; à 90 km/h, environ 66 minutes 40 secondes ; à 110 km/h, environ 54 minutes 33 secondes ; à 130 km/h, environ 46 minutes 9 secondes. Passer de 80 à 90 km/h fait gagner environ 8 minutes 20 secondes.

Passer de 90 à 110 en fait gagner environ 12 minutes. Passer de 110 à 130 en fait gagner encore environ 8 minutes 20 secondes. La vitesse continue donc à faire gagner du temps. Mais le gain marginal se réduit à mesure que l'on monte. Et dans le monde réel, le gain est souvent inférieur au calcul théorique. Un rond-point, un ralentissement, un poids lourd, un

péage, un bouchon ou une traversée de ville font disparaître une partie de la différence.

L'énergie, elle, a déjà été dépensée. C'est ici que la question « plus vite ou moins vite ? » devient plus intéressante. Elle ne se résout pas par une morale de la lenteur. Elle se résout par une comparaison : combien d'énergie supplémentaire ai-je dépensé pour combien de minutes effectivement gagnées ?

4. LE VENT PEUT CHANGER LE TRAJET SANS CHANGER LE COMPTEUR

La voiture réagit à la vitesse de l'air, pas seulement à sa vitesse par rapport au sol. À 90 km/h avec 20 km/h de vent de face, la carrosserie voit environ 110 km/h d'air relatif. Le conducteur ne gagne pourtant aucun temps supplémentaire. La situation est énergétiquement mauvaise : la résistance aérodynamique augmente sans augmentation correspondante de la vitesse au sol. L'inverse se produit avec un vent arrière. Cette observation paraît secondaire. Elle rappelle pourtant une chose essentielle : la consommation n'est jamais une propriété fixe du véhicule. C'est le résultat d'un véhicule dans des conditions données.

5. ACCÉLÉRER, C'EST STOCKER DE L'ÉNERGIE DANS LA MASSE

Quand une voiture accélère, elle acquiert de l'énergie cinétique. La formule est simple : $E = 1/2 m v^2$. Elle dit deux choses. Doubler la masse double l'énergie nécessaire. Doubler la vitesse la multiplie par quatre. Pour une voiture de 1 500 kg, sans compter les pertes de conversion : à 50 km/h, l'énergie cinétique est d'environ 0,040 kWh ; à 90 km/h, environ 0,130 kWh ; à 110 km/h, environ 0,195 kWh ; à 130 km/h, environ 0,272 kWh. Ces nombres semblent petits face à un réservoir de carburant ou une batterie de plusieurs dizaines de

kilowattheures. Mais dans une ville, cette énergie peut être créée et détruite des dizaines ou des centaines de fois.

C'est là que le style de conduite intervient. Un conducteur qui accélère fortement vers un feu rouge ne consomme pas seulement parce que son moteur tourne dans un régime particulier. Il fabrique une énergie cinétique dont il sait déjà qu'il devra se débarrasser quelques secondes plus tard.

6. MONTER, C'EST STOCKER DE L'ÉNERGIE DANS L'ALTITUDE

La gravité crée un autre réservoir. L'énergie potentielle vaut : $E = mgh$. Pour notre voiture de 1 500 kg, monter de 100 mètres représente environ 0,41 kWh d'énergie mécanique. Cette énergie n'a pas disparu une fois le sommet atteint. Elle est stockée dans la position du véhicule. À la descente, la gravité la restitue. Que devient-elle ?

Si le conducteur laisse la voiture accélérer, elle devient énergie cinétique. Si la vitesse doit rester constante, elle doit être dissipée ou récupérée. Sur une voiture traditionnelle, une partie finit dans les freins ou dans le frein moteur. Sur un véhicule électrifié, une partie peut retourner à la batterie. Mais aucune machine réelle ne récupère tout. Le relief rend donc particulièrement visible la différence entre préserver, dissiper et reconvertir.

7. FREINER, C'EST DÉCIDER OÙ L'ÉNERGIE FINIT

Le frein à friction fait quelque chose de très simple. Il transforme l'énergie mécanique en chaleur. Les plaquettes serrent le disque. Le disque chauffe. L'air et les pièces environnantes récupèrent progressivement cette chaleur. L'énergie qui faisait avancer la voiture n'est plus disponible pour la propulsion. Elle n'est pas détruite au sens physique. Elle est devenue une forme beaucoup moins utile pour le véhicule.

C'est pourquoi une conduite faite d'accélération et de freinages répétés est énergétiquement coûteuse. Il faut produire l'énergie de vitesse. Puis la transformer en chaleur. Puis en produire de nouveau pour repartir. Le Department of Energy synthétise bien l'effet observable : une conduite agressive associant vitesse, accélérations rapides et freinages durs peut réduire l'économie de carburant de 15 à 30 % à vitesse autoroutière et de 10 à 40 % en trafic stop-and-go selon véhicules et conditions.[3] Ces fourchettes ne décrivent pas une loi universelle. Elles montrent l'ordre de grandeur possible d'un comportement qui crée puis détruit inutilement de l'énergie.

8. RÉGÉNÉRER N'EST PAS ANNULER

L'hybride et le véhicule électrique modifient la fin de cette histoire. Lors du ralentissement, le moteur électrique peut fonctionner comme générateur. Les roues entraînent la machine électrique. L'électronique convertit l'énergie. La batterie la stocke. Le DOE décrit ce principe comme la récupération d'une partie de l'énergie qui serait normalement perdue au freinage.[4] Le mot important est « partie ».

La récupération comporte des pertes. La machine électrique n'est pas parfaite. L'électronique n'est pas parfaite. La batterie n'accepte pas et ne restitue pas l'énergie sans pertes. Puis, lorsqu'il faudra réaccélérer, l'énergie fera le chemin inverse. Cela conduit à une hiérarchie simple. Récupérer une énergie qu'il fallait de toute façon enlever au véhicule est utile. Mais créer inutilement cette énergie pour la récupérer ensuite ne l'est pas.

9. COASTING, FREIN MOTEUR ET RÉGÉNÉRATION SONT TROIS GESTES DIFFÉRENTS

Le langage courant mélange souvent toutes les décélérations. Physiquement, elles sont pourtant différentes. Le coasting cherche à réduire le plus possible le couple moteur ou freinant afin que la voiture conserve son inertie et ralentisse essentiellement sous l'effet de la route et de l'air. Le frein moteur utilise la résistance du groupe thermique pour ralentir plus fortement.

La régénération utilise le groupe électrique pour ralentir tout en récupérant une partie de l'énergie. Une étude SAE de 2023 comparant différentes stratégies de décélération sur véhicule électrique trouve précisément ce compromis : le coasting minimise l'énergie consommée dans le scénario modélisé ; la régénération peut permettre un temps de trajet plus court ; des stratégies intermédiaires donnent le meilleur compromis lorsque temps et consommation sont pondérés ensemble.[5] La logique physique est intuitive. Si le véhicule devra continuer à avancer, conserver directement l'énergie mécanique évite une conversion. Si le véhicule doit réellement ralentir, alors la récupération devient préférable à la dissipation. Le meilleur choix dépend donc de la trajectoire future. Pas de la quantité instantanée affichée en vert sur un écran.

10. LE FREIN MOTEUR PEUT AFFICHER ZÉRO CARBURANT ET PERDRE QUAND MÊME DE L'ÉNERGIE

Sur beaucoup de véhicules thermiques modernes, l'injection peut être coupée pendant une décélération en prise. L'ordinateur affiche alors parfois une consommation instantanée nulle. C'est exact du point de vue du carburant injecté. Mais pas du point de vue de l'énergie du véhicule. Les

roues entraînent le moteur. Compression, pompage, frottements et accessoires absorbent de l'énergie.

La voiture ralentit. L'énergie cinétique est donc dissipée. Cela n'est pas mauvais si l'on devait ralentir. Mais si l'objectif était simplement de parcourir encore quelques centaines de mètres avant de perdre de la vitesse, un mode de faible traînée peut être énergétiquement plus favorable. Les constructeurs modernes commencent d'ailleurs à intégrer des fonctions de coasting piloté, parfois avec découplage de la transmission. Il n'est pas nécessaire — ni souhaitable — de passer au point mort pour comprendre ou appliquer le principe.

11. PLUS DE RÉCUPÉRATION PEUT SIGNIFIER PLUS DE GASPILLAGE

L'une des erreurs les plus séduisantes consiste à féliciter un véhicule parce qu'il a récupéré beaucoup d'énergie. Mais une forte récupération peut simplement signifier qu'il y avait beaucoup d'énergie à enlever. Une étude Argonne publiée par SAE en 2026 sur une Tesla Model 3 fournit une illustration instructive.[6] Dans les essais contrôlés, la conduite agressive récupère beaucoup d'énergie au freinage.

Elle reste pourtant nettement moins efficiente que les cycles urbain et autoroutier plus modérés. Le véhicule récupère davantage parce qu'il a davantage accéléré et décéléré. L'indicateur pertinent n'est donc pas : « combien ai-je récupéré ? » C'est : « combien ai-je consommé net pour accomplir le trajet ? »

12. LA RÉGÉNÉRATION A DES LIMITES

Même lorsque ralentir est nécessaire, la récupération n'est pas toujours disponible à pleine puissance. Elle dépend de la vitesse, du moteur, de l'adhérence, de la température et surtout

de la batterie. Une batterie froide peut accepter moins de puissance ; une batterie presque pleine peut ne plus avoir assez de marge pour absorber toute l'énergie de freinage.

Les manuels Tesla indiquent explicitement ces limitations lorsque la batterie est froide ou déjà fortement chargée.[7] Une étude SAE sur la performance thermique des freins de véhicules électriques rappelle pourquoi les freins frictionnels restent indispensables : ils doivent pouvoir gérer les cas où la régénération est indisponible ou limitée, par exemple batterie pleine, température défavorable ou panne du système.[8] La récupération complète n'existe donc pas comme garantie. La sécurité exige toujours une capacité de freinage mécanique indépendante.

13. POURQUOI L'HYBRIDE AIME LA VILLE

L'hybride possède plusieurs avantages précisément là où le thermique classique souffre. À l'arrêt, il peut couper son moteur. À faible vitesse, certains hybrides peuvent utiliser le moteur électrique. À l'accélération, le moteur électrique peut aider le thermique. Au freinage, il récupère de l'énergie. Et, surtout, l'architecture peut permettre au moteur thermique de fonctionner plus souvent dans des zones de meilleur rendement au lieu de suivre directement toutes les demandes instantanées du conducteur.

Le DOE résume ces mécanismes dans ses documents sur les hybrides : arrêt du moteur au ralenti, récupération au freinage, assistance électrique et possibilité d'un moteur thermique plus petit.[9] C'est pourquoi un hybride peut, paradoxalement, obtenir une meilleure économie en ville que sur autoroute. La ville crée beaucoup de ralentissements. Le thermique traditionnel les subit. L'hybride peut transformer une partie de

ces événements en opportunités de récupération et de gestion du moteur.

14. LE MOTEUR THERMIQUE N'A PAS UN RENDEMENT UNIQUE

Un moteur thermique ne transforme pas une proportion fixe du carburant en travail utile. Son rendement varie avec le régime, la charge, la température, le mélange, l'avance à l'allumage et d'autres paramètres. Les cartes de rendement utilisées pour concevoir les stratégies hybrides montrent précisément qu'il existe des zones de fonctionnement beaucoup plus favorables que d'autres.[13] Le Department of Energy rappelle d'ailleurs que, sur une voiture thermique conventionnelle, seule une fraction de l'énergie du carburant atteint finalement les roues et que les pertes moteur — chaleur à l'échappement, refroidissement, pompage et frottements — changent selon le type de conduite.[14] Cela explique pourquoi « accélérer le plus doucement possible » n'est pas une règle physique universelle.

Sur un thermique, une demande très faible peut maintenir le moteur dans une zone de rendement médiocre, notamment parce que les pertes fixes et de pompage prennent une part importante du travail produit. À l'inverse, demander brutalement une forte puissance peut enrichir le mélange, augmenter les pertes et conduire ensuite à un freinage inutile. La bonne stratégie n'est donc pas de minimiser à tout instant la position de l'accélérateur.

Elle est d'obtenir le service voulu avec le moins d'énergie totale, en évitant surtout les accélérations qui devront être annulées peu après. L'hybride exploite exactement cette propriété. La batterie et le moteur électrique peuvent découpler partiellement la puissance demandée aux roues du point de fonctionnement instantané du moteur thermique. Le moteur

peut alors fonctionner plus souvent près d'une zone efficiente, s'arrêter lorsqu'il serait très mauvais, ou produire temporairement davantage que la demande des roues pour charger la batterie lorsque le bilan global le justifie. Ce déplacement de charge n'est pas gratuit : les conversions électriques ont elles aussi des pertes. Mais il donne à la stratégie de contrôle une liberté qu'un groupe thermique directement lié aux roues possède moins.

15. LA MASSE N'EST PAS TOUJOURS L'ENNEMI PRINCIPAL — MAIS ELLE REVIENT À CHAQUE CHANGEMENT D'ÉTAT

Sur autoroute parfaitement plane et stabilisée, une voiture lourde mais très aérodynamique peut surprendre. À grande vitesse, l'air domine souvent. La masse reste toutefois présente dans le roulement. Et surtout, elle réapparaît chaque fois que le véhicule change de vitesse ou d'altitude. Plus lourd signifie : plus d'énergie à l'accélération ; plus d'énergie à la montée ; davantage d'énergie à enlever au freinage ; davantage de charge sur les pneus. La récupération peut restituer une partie de cette énergie sur un VE. Elle ne rend pas la masse gratuite. Le DOE estime historiquement qu'une réduction de masse de 10 % sur un véhicule thermique peut améliorer l'économie de carburant d'environ 6 à 8 %, même si le gain exact dépend fortement du véhicule et de son usage.[1] Il faut donc résister à deux slogans contraires. « Le poids ne compte pas sur un électrique » est faux. « Le poids explique toute la consommation » l'est aussi. Le contexte de conduite décide de son importance.

16. LES PNEUS CONSOMMENT SANS QUE LE CONDUCTEUR LE VOIE

La résistance au roulement provient en grande partie des déformations du pneu. À chaque tour, le caoutchouc se déforme

puis revient. Une partie de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur. Un pneu sous-gonflé se déforme davantage et augmente cette perte. L'EPA rappelle donc que le sous-gonflage augmente la consommation et l'usure.[10] Des essais historiques de l'agence trouvaient une sensibilité de l'ordre de quelques dixièmes de pourcent d'économie de carburant par psi dans leurs conditions de test.[11]

Il serait mauvais d'utiliser ce chiffre comme règle universelle sur les pneus contemporains. Le bon principe est plus simple : respecter la pression recommandée par le constructeur. Surgonfler dans le but de gagner quelques fractions de consommation peut dégrader comportement, confort ou sécurité. L'optimisation énergétique reste subordonnée à la fonction du pneu.

17. LE MOTEUR FROID ET LES AUXILIAIRES CHANGENT L'ÉCHELLE DU TRAJET

La consommation par kilomètre est particulièrement mauvaise sur certains petits trajets thermiques. Pourquoi ? Parce qu'une partie du coût énergétique ne dépend pas directement des kilomètres : il faut réchauffer le moteur, réduire les frottements à froid, faire monter les systèmes de dépollution en température, chauffer ou refroidir l'habitacle et alimenter les pompes, ventilateurs, dégivrage et électronique. L'EPA rappelle que les courts trajets à froid dégradent fortement l'économie de carburant et recommande, lorsque cela est pratique, de regrouper plusieurs déplacements plutôt que de répéter les démarrages à froid.[12]

Sur un véhicule électrique, le problème moteur disparaît mais pas celui des auxiliaires. Le chauffage ou la climatisation peut représenter une part importante de l'énergie d'un très court trajet, particulièrement par température extrême. Le

même véhicule peut donc avoir deux consommations très différentes selon la longueur du parcours.

18. UNE CONDUITE SOBRE EST D'ABORD UNE CONDUITE PRÉDICTIVE

Nous pouvons maintenant reformuler les conseils de conduite sans jargon moral. Le principe n'est pas : « accélérer toujours lentement ». Une accélération trop lente peut maintenir un moteur thermique dans un mauvais régime plus longtemps. Le principe n'est pas non plus : « ne jamais freiner ». La sécurité et le trafic imposent évidemment de freiner. Le principe est : ne pas créer une énergie que l'on sait déjà devoir détruire.

Voir tôt le feu rouge. Lever plus tôt l'accélérateur. Ne pas accélérer vers une file arrêtée. Maintenir des distances permettant de lisser les variations de vitesse. Ne pas transformer chaque petite baisse de vitesse du trafic en cycle accélération-freinage. À vitesse stabilisée, choisir une vitesse compatible avec le vrai gain de temps recherché. En descente, utiliser la stratégie qui maintient la vitesse en sécurité tout en limitant les pertes. Sur un véhicule électrifié, privilégier la récupération lorsqu'un ralentissement est nécessaire. Lorsque ralentir n'est pas encore nécessaire, préserver l'inertie peut être meilleur. C'est pourquoi le terme le plus juste n'est peut-être pas « éco-conduite » : c'est une conduite prédictive.

19. LE MEILLEUR JOULE EST PARFOIS CELUI QU'ON N'A PAS EU À CONVERTIR

L'automobile moderne donne facilement l'impression que toute énergie perdue peut être récupérée. Le thermique améliore son rendement, l'hybride récupère au freinage et l'électrique affiche des kilowattheures remis dans la batterie. Mais chaque conversion a un coût : carburant vers chaleur,

chaleur vers travail mécanique, mouvement vers électricité, électricité vers batterie, batterie vers électricité, puis électricité vers mouvement. Plus nous pouvons éviter certaines étapes, moins nous avons besoin de perfectionner celles qui restent.

Voilà pourquoi l'anticipation est si puissante. Éviter d'accélérer inutilement supprime à la fois l'énergie d'accélération et la nécessité de la récupérer. Rouler un peu moins vite réduit directement la traînée aérodynamique au lieu de chercher ensuite à récupérer une énergie déjà envoyée dans l'air. Alléger réduit simultanément accélération, montée et roulement. Un pneu correctement gonflé réduit une perte continue.

Un hybride coupe le moteur là où il ne sert à rien. La régénération récupère là où le ralentissement est inévitable. Le système le plus efficient n'est donc pas celui qui récupère le plus. C'est celui qui accomplit le service demandé avec le moins de conversions inutiles. Cette conclusion nous conduit directement au chapitre suivant. Car toutes les pertes que nous venons de suivre physiquement ont aussi une existence matérielle. Le pneu s'use. Le frein émet des particules. La batterie vieillit. Les composants sont remplacés. La voiture finit par sortir du parc. Après avoir suivi l'énergie, il faudra donc suivre la matière.

NOTES ET SOURCES

[1] U.S. Department of Energy, Quadrennial Technology Review, « Lightweighting and Aerodynamics ».

[2] Oak Ridge National Laboratory, Transportation Energy Data Book, données « Fuel Economy by Vehicle Speed ».

[3] U.S. Department of Energy, Alternative Fuels Data Center, « Efficient Driving to Conserve Fuel ».

[4] U.S. Department of Energy, Alternative Fuels Data Center, « Hybrid Electric Vehicles » et documents sur le freinage régénératif.

- [5] William Hom & Douglas Nelson, « Energy Modeling of Deceleration Strategies for Electric Vehicles », SAE 2023-01-0347.
- [6] Benjamin Branch Pierce et al., Argonne National Laboratory, « Characterizing Regenerative Braking of the Tesla Model 3 Using Chassis Dynamometer Testing », SAE 2026-01-0453.
- [7] Tesla, manuels propriétaires Model 3 / Model S, sections « Regenerative Braking » et limitations liées à la batterie.
- [8] D. Antanaitis, « Brake System Thermal Performance for Brazil Market Battery Electric Vehicles », SAE 2019-36-0019.
- [9] U.S. Department of Energy, Alternative Fuels Data Center, « Hybrid Electric Vehicles ».
- [10] U.S. Environmental Protection Agency, « Your Mileage May Vary » et « Discover Fuel-Saving Tips ».
- [11] U.S. Environmental Protection Agency, rapports techniques sur pression des pneus et économie de carburant.
- [12] U.S. Environmental Protection Agency, ressources sur trajets courts, moteur froid et économie de carburant.
- [13] Beyfuss, Hofmann & Geringer, « Efficiency Prediction for Optimal Load Point Determination of Internal Combustion Engines in Hybrid Drives », SAE 2019-24-0204.
- [14] U.S. Department of Energy, ressources sur les pertes énergétiques des véhicules thermiques conventionnels et l'efficacité des chaînes de traction.

CHAPITRE 6 — D’OÙ VIENT LA MATIÈRE, OÙ VA-T-ELLE ?

OUVERTURE — LA VOITURE N’ARRIVE JAMAIS ENTIÈRE À LA CASSE

Nous imaginons facilement le cycle matériel d’une voiture comme une ligne simple. Des matières premières entrent dans une usine. Une voiture en sort. Elle roule pendant quinze ou vingt ans. Puis elle arrive dans une casse, où ses matériaux sont recyclés ou jetés. Cette image est pratique. Elle est aussi fausse. La matière commence à circuler bien avant l’assemblage final. Le minerai a été extrait, transformé en acier ou en aluminium, laminé, moulé, usiné, peint, transporté et assemblé. Les polymères viennent d’autres chaînes. Le verre, le cuivre, les textiles, le caoutchouc, les fluides et l’électronique ont chacun leur histoire.

Et surtout, la voiture ne reste pas matériellement intacte pendant son usage. Ses pneus laissent une partie de leur bande de roulement sur la route. Ses freins perdent de la matière. Des huiles et des liquides sont remplacés. Des filtres, des roulements, des amortisseurs, des pièces de carrosserie, des calculateurs ou des moteurs peuvent quitter le véhicule bien avant lui. Certaines pièces sont réparées, d’autres réemployées, d’autres remanufacturées, d’autres détruites.

Enfin, la voiture elle-même ne connaît pas une seule fin. Elle peut devenir techniquement inutilisable. Elle peut être réparable mais économiquement abandonnée. Elle peut être détruite par accident. Elle peut sortir du parc français et continuer sa vie dans un autre pays. Elle peut devenir

juridiquement un véhicule hors d'usage. Elle peut être démontée avant d'être broyée. Suivre la matière oblige donc à abandonner l'idée d'un objet fermé. La voiture est un stock temporaire traversé par des flux.

1. DE QUOI UNE VOITURE EST-ELLE RÉELLEMENT FAITE ?

La première surprise est que cette question très simple n'a pas une réponse unique. Le Joint Research Centre de la Commission européenne a comparé plusieurs nomenclatures de véhicules publiées dans la littérature. Dans ces inventaires, l'acier représente environ 55 à 68 % de la masse du véhicule. Les plastiques se situent autour de 9 à 11 %, l'aluminium autour de 6 à 12 %, le caoutchouc autour de 3,5 à 7 %, le verre autour de 2 à 3 %. Le cuivre, les fluides, les textiles, les peintures, les colles, l'électronique et d'autres matériaux complètent l'ensemble.[1]

Ces fourchettes disent quelque chose d'important. Une automobile reste d'abord une machine métallique. Mais elles disent aussi qu'« une tonne et demie de voiture » n'est pas une tonne et demie d'une matière homogène. L'acier de la caisse ne remplit pas la même fonction que l'aluminium d'un berceau, le cuivre d'un faisceau, le polymère d'un tableau de bord, le caoutchouc d'un pneu ou le verre d'un pare-brise. Ces matières n'ont ni la même valeur, ni la même énergie de production, ni les mêmes contraintes de séparation, ni les mêmes débouchés après usage.

Pour comprendre l'automobile matériellement, il faut donc regarder au moins deux choses à la fois : combien de matière nous mobilisons, et sous quelle forme nous l'organisons. Nous laisserons volontairement de côté ici la chaîne détaillée de la batterie de traction : ses matières, ses chimies, sa seconde vie et son recyclage appartiennent au chapitre 9.

2. POURQUOI LA COMPOSITION EXACTE EST PLUS DIFFICILE À CONNAÎTRE QU'ON NE L'IMAGINE

On pourrait penser qu'en 2026 il suffirait d'ouvrir une base de données et de connaître au kilogramme près la composition moyenne d'une voiture. Ce n'est pas le cas. Le JRC souligne que les nomenclatures complètes et transparentes sont rares. Les véhicules rassemblent des milliers de composants, plusieurs rangs de fournisseurs et des données qui restent souvent confidentielles. Les études de cycle de vie peuvent disposer d'inventaires détaillés sans que la totalité de ces inventaires soit publique.[1]

Le paradoxe est que l'industrie, elle, a besoin d'informations très fines. L'International Material Data System, ou IMDS, a été développé pour que constructeurs et fournisseurs déclarent les substances et matériaux présents dans les pièces. Il permet notamment de suivre les substances réglementées et de documenter la composition de composants à un niveau qu'aucun observateur extérieur ne pourrait reconstruire simplement en démontant quelques véhicules.[1] Le problème n'est donc pas l'absence absolue d'information.

C'est l'écart entre l'information disponible à l'intérieur de la chaîne industrielle et l'information réellement accessible pour comparer publiquement des véhicules entiers. Cette limite impose une règle au reste de ce chapitre : les pourcentages de composition seront des ordres de grandeur, pas une fausse précision universelle.

3. ALLÉGER : MOINS D'ACIER NE VEUT PAS FORCÉMENT DIRE MOINS DE MATIÈRE

L'allègement paraît être l'exemple parfait d'une optimisation sans ambiguïté. Une voiture plus légère demande moins d'énergie à accélérer, à monter et, dans une certaine mesure, à

faire rouler. Mais comment l'allège-t-on ? On peut utiliser moins de matière. On peut aussi remplacer une matière lourde par une autre plus légère. Ces deux opérations ne sont pas équivalentes. Remplacer une pièce en acier par une pièce en aluminium, un polymère renforcé ou un composite peut réduire la masse finale tout en augmentant la quantité ou la complexité d'autres chaînes de production. L'Agence internationale de l'énergie montre bien ce déplacement dans ses scénarios d'efficacité matière : un allègement automobile plus poussé réduit la demande d'acier mais peut augmenter celle d'aluminium et de plastiques ou composites.[2]

Cela ne veut pas dire que l'allègement est mauvais. Cela signifie qu'une tonne économisée à l'usage n'efface pas automatiquement les différences de production, de réparation et de recyclage des matériaux qui la remplacent. Le bon indicateur n'est donc pas simplement : « combien pèse la voiture ? » Il faut demander : quelle masse, de quelles matières, pour quelle fonction, pendant combien de temps, et avec quelle possibilité de conserver cette fonction après une panne ou un accident ?

4. LA MATIÈRE A DÉJÀ UNE HISTOIRE AVANT L'USINE D'ASSEMBLAGE

L'usine automobile est spectaculaire parce qu'on y voit la voiture prendre forme. Mais l'essentiel du travail matériel a commencé ailleurs. L'acier a nécessité extraction, concentration, métallurgie, coulée puis transformation en tôles ou pièces. L'aluminium a suivi une autre chaîne. Le cuivre a été extrait puis affiné avant de devenir conducteur. Les polymères ont été synthétisés puis formulés. Les pneus combinent caoutchoucs, charges, fibres et métaux. Le verre a été produit, formé et traité.

À chaque étape, il existe des rendements de procédé. Une feuille découpée laisse des chutes. Un usinage transforme une partie de la pièce brute en copeaux. Une pièce rejetée au contrôle peut retourner vers une filière matière sans avoir jamais roulé un kilomètre. L'IEA classe précisément l'amélioration des rendements de fabrication parmi les stratégies d'efficacité matière, aux côtés de la conception pour une longue durée, du réemploi et du recyclage.[2]

Cette observation change notre manière de définir le gaspillage. Le gaspillage n'apparaît pas seulement lorsque la voiture devient une épave. Il peut être créé ou évité à la conception, au choix du procédé, à l'usinage, au contrôle qualité, à la réparation et à chaque remplacement de pièce.

5. UNE VOITURE S'USE EN ROULANT — ET UNE PARTIE DISPARAÎT SUR LA ROUTE

Le chapitre précédent suivait l'énergie perdue par résistance et friction. Il faut maintenant regarder la même scène du point de vue de la matière. Le frottement ne fait pas que transformer de l'énergie en chaleur. Il use. Des particules quittent les pneus. D'autres viennent des disques et des plaquettes. La chaussée elle-même s'use. Les véhicules remettent aussi en suspension une partie des poussières déjà déposées.

L'OCDE insiste sur cette séparation des sources : usure des pneus, usure des freins, usure de la route et remise en suspension ne sont pas le même phénomène.[3] C'est une distinction plus importante qu'elle n'en a l'air. Dire qu'un véhicule émet « tant de particules hors échappement » peut regrouper des matières de compositions, tailles et mécanismes différents. Une masse totale de gomme perdue n'est pas un chiffre de PM_{2,5}. Un nombre de particules ultrafines n'est pas une masse de microplastiques. Une poussière remise en

suspension n'est pas une matière nouvellement arrachée au véhicule. La voiture n'attend donc pas sa fin de vie pour produire des déchets. Une partie de sa fin de vie matérielle se déroule kilomètre après kilomètre.

6. LE PNEU : LE DÉCHET QUI SE FORME KILOMÈTRE APRÈS KILOMÈTRE

Un pneu est conçu pour adhérer. Cette phrase contient déjà son problème matériel. Pour transmettre accélération, freinage et effort latéral, la gomme doit interagir avec une surface abrasive. Le contact se déforme, chauffe, glisse localement et arrache progressivement de la matière. Le pneu peut encore avoir une carcasse parfaitement fonctionnelle alors qu'une partie de sa bande de roulement a déjà quitté l'objet.

L'OCDE synthétise plusieurs travaux montrant que la charge verticale tend à augmenter l'usure, même si les études ne donnent pas toutes la même forme mathématique à cette relation. La vitesse, les accélérations, le freinage, le type de pneu, sa pression et le revêtement modifient également le phénomène.[3] C'est pourquoi la masse du véhicule revient ici. Elle n'est pas seulement un problème énergétique.

Toutes choses égales par ailleurs, davantage de charge sur les pneus augmente la contrainte mécanique qu'ils doivent supporter. Mais le garde-fou est essentiel : toutes choses ne sont presque jamais égales. Deux voitures de masses différentes peuvent employer des dimensions, composés, pressions, géométries de suspension et styles de conduite différents. Il est donc plus solide d'écrire que la masse est un facteur d'usure que de transformer un coefficient expérimental en vérité universelle pour tout le parc.

7. ÉLECTRIFIER LA VOITURE NE SUPPRIME PAS LES PARTICULES HORS ÉCHAPPEMENT

L'électrique change profondément une partie du bilan. Le freinage régénératif utilise le moteur électrique pour ralentir et renvoyer une partie de l'énergie vers la batterie. Lorsque cette décélération suffit, les freins à friction travaillent moins. Leur usure peut donc diminuer fortement. Mais les pneus continuent à toucher la route. La chaussée continue à s'user. Les poussières continuent à être remises en suspension.

Et une batterie importante peut alourdir le véhicule, ce qui peut augmenter certains flux d'usure. L'OCDE montre justement que la comparaison dépend de la masse et du type de véhicule : des véhicules électriques légers peuvent obtenir de meilleurs résultats hors échappement que leurs équivalents thermiques, tandis que des véhicules électriques lourds et à grande autonomie peuvent perdre une partie de cet avantage sur certaines métriques.[3] La conclusion n'est donc ni « l'électrique ne change rien », ni « l'électrique supprime la pollution automobile ». Elle est plus précise.

Un véhicule électrique à batterie n'émet pas de gaz d'échappement à l'usage et réduit fortement l'usage des freins à friction dans de nombreux cas. Elle ne supprime pas les flux de matière liés au contact entre un véhicule, ses pneus et la route. Le droit commence d'ailleurs à traiter ce problème comme tel. Euro 7 introduit des règles concernant les particules de frein et l'abrasion des pneus, en plus des émissions d'échappement.[7]

8. RÉPARER, C'EST CONSERVER PLUS QUE DES KILOGRAMMES

Une pièce de voiture n'est pas seulement une quantité de matière. Prenons un alternateur. On pourrait le peser et dire qu'il contient du cuivre, de l'acier, de l'aluminium, des polymères et quelques composants électroniques. Mais cette

description oublie précisément ce que l'industrie a ajouté à la matière. Le cuivre a été bobiné. Les surfaces ont été usinées. Les roulements ont été ajustés. L'ensemble a été assemblé, équilibré, testé et transformé en fonction.

Si l'alternateur connaît une panne localisée, le broyeur immédiatement pour récupérer ses métaux détruit cette organisation. Réparer ou réemployer une pièce conserve une partie de la matière mais surtout une plus grande part du travail déjà incorporé. Voilà pourquoi la circularité ne commence pas au recyclage. Elle commence par la question : peut-on conserver l'objet, le sous-ensemble ou la pièce dans une fonction utile ?

Cette hiérarchie n'est pas absolue. Une pièce de sécurité fissurée ne doit pas être réutilisée pour sauver quelques kilogrammes de matière. Une remise en état très énergivore ou peu fiable peut ne pas être pertinente. Un composant ancien peut aussi bloquer une amélioration importante de sécurité ou d'efficacité. Mais sans cette comparaison, « recycler » peut devenir un mot flatteur pour une destruction prématurée de valeur fonctionnelle.

9. REMANUFACTURER : REFAIRE UNE VIE DE SERVICE AVANT DE REFAIRE DE LA MATIÈRE

Le remanufacturing pousse cette logique plus loin. Il ne consiste pas simplement à remettre une pièce d'occasion sur une voiture. Un composant est démonté, contrôlé, nettoyé, les éléments usés sont remplacés ou remis à niveau, puis l'ensemble est réassemblé pour retrouver une fonction spécifiée. L'intérêt matériel est évident : on essaie de conserver la géométrie, les pièces encore bonnes et le travail industriel déjà incorporé au lieu de revenir immédiatement au métal ou au polymère.

Une étude publiée en 2021 a modélisé sur cinquante ans les cycles de vie de moteurs automobiles. Dans ce cas, le remanufacturing réduit la dissipation finale d'environ 3 % pour l'acier, 2 % pour le nickel et 5 % pour le chrome par rapport à un scénario reposant sur le recyclage sans remanufacturing.[9] Ces pourcentages ne doivent surtout pas être appliqués à toute automobile. Ils dépendent du modèle, du composant et de l'horizon étudiés.

Le résultat utile est le mécanisme : prolonger la fonction d'un ensemble peut éviter certaines pertes de matière que le recyclage ne récupère jamais parfaitement. Le chapitre 2 posait la question de la maintenabilité. Nous voyons ici sa conséquence matérielle. Une architecture facile à démonter, diagnostiquer et remettre en état ne change pas seulement le coût de réparation. Elle change aussi la quantité de matière fonctionnelle que le système peut conserver.

10. LES DIFFÉRENTES MORTS D'UNE VOITURE

À quel moment une voiture devient-elle un déchet ? La réponse paraît évidente jusqu'au moment où l'on regarde un véhicule réel. Un moteur cassé peut être remplacé. Une carrosserie très endommagée peut être redressée. Un véhicule inondé peut parfois être techniquement restaurable mais économiquement ou réglementairement condamné. Une voiture ancienne de faible valeur peut être envoyée à la casse pour une réparation de quelques milliers d'euros alors qu'une voiture rare subirait la même réparation sans hésitation.

La fin de vie est donc aussi une décision économique. Elle dépend du coût de réparation, de la valeur du véhicule, des pièces disponibles, de la main-d'œuvre, de l'assurance, de la réglementation et de la confiance que l'on accorde à la remise en état. Il faut alors distinguer plusieurs morts. La mort

technique : le système ne peut plus remplir sa fonction dans des conditions acceptables.

La mort économique : la remise en état reste possible mais n'est plus jugée rationnelle. La mort accidentelle : un événement détruit assez de valeur pour sortir le véhicule du service. La mort juridique : le véhicule est classé comme hors d'usage et entre dans le régime des déchets. Et il existe une fausse mort statistique : la voiture disparaît du parc d'un pays mais continue ailleurs. Ces catégories se recouvrent parfois. Elles ne sont pourtant pas interchangeables.

11. EXPORTER N'EST PAS DÉTRUIRE

Lorsqu'une voiture disparaît des immatriculations françaises ou européennes, nous pouvons être tentés de considérer son histoire comme terminée. Pourtant le marché international de l'occasion prolonge la vie de millions de véhicules au-delà de leur premier pays d'usage. Le Programme des Nations unies pour l'environnement suit les exportations de véhicules légers d'occasion depuis l'Union européenne, les États-Unis, le Japon et la Corée vers les pays du Sud.[8] Matériellement, ce transfert peut avoir deux effets opposés.

Il peut prolonger l'usage d'un produit déjà fabriqué, donc retarder la fabrication d'un autre véhicule. Il peut aussi transférer vers un pays disposant de moins d'infrastructures de contrôle, de réparation ou de traitement final un véhicule plus ancien, ses émissions et sa future fin de vie. La question ne peut donc pas être réglée par le seul mot « réemploi ».

Il faut regarder l'état réel du véhicule et le système qui le reçoit. C'est exactement ce que cherche désormais à mieux distinguer le nouveau règlement européen : un véhicule encore apte à circuler peut être une occasion ; un véhicule devenu

juridiquement déchet ne doit pas être maquillé en occasion pour contourner la filière de traitement.[5][6] Sortir d'un parc n'est donc ni recycler ni détruire. C'est parfois seulement changer de territoire.

12. QUE SE PASSE-T-IL DANS UNE FILIÈRE DE VÉHICULE HORS D'USAGE ?

Lorsqu'un véhicule entre réellement dans une filière autorisée de fin de vie, il ne devrait pas être envoyé entier dans un broyeur. La première étape est la dépollution. Les fluides et certains composants doivent être retirés ou traités. Des pièces peuvent être démontées pour réemploi. Des éléments ciblés peuvent suivre des filières spécifiques. Le reste de la structure peut ensuite être broyé.

Des procédés mécaniques et physiques séparent alors différentes fractions : ferreux, non-ferreux et résidus plus hétérogènes. Cette description explique pourquoi la recyclabilité théorique d'une voiture n'est pas identique à son recyclage réel. Une matière peut être techniquement recyclable mais trop contaminée, trop mélangée, trop coûteuse à séparer ou sans débouché économique suffisant. Inversement, une pièce qui semble destinée au recyclage peut finalement être réemployée si elle est démontée avant broyage. La chronologie du traitement change donc la valeur conservée.

13. POURQUOI 95 % DE VALORISATION NE SIGNIFIE PAS 95 % DE BOUCLE FERMÉE

L'Europe affiche des taux de traitement élevés. En 2023, Eurostat estime qu'environ 4,3 millions de voitures particulières, utilitaires légers et véhicules comparables ont été déclarés hors d'usage dans l'Union européenne, pour une masse totale d'environ 5,0 millions de tonnes.[4] Le taux de réemploi et

de recyclage était de 88,3 % en masse. Le taux de réemploi et de valorisation atteignait 93,7 %.[4] Pourquoi deux chiffres ?

Parce que le mot « valorisation » est plus large que « recyclage ». Une matière peut être utilisée pour produire de l'énergie sans redevenir matière première. L'objectif réglementaire historique de 95 % concerne réemploi plus valorisation ; celui de 85 % concerne réemploi plus recyclage.[4] Cette distinction suffit à corriger une formule très fréquente : « une voiture est recyclée à 95 % ». Non. Un système peut approcher 95 % de valorisation en masse sans transformer 95 % d'une voiture en matières aptes à refaire une voiture équivalente. Et même le chiffre de recyclage ne dit pas encore quelle qualité de matière a été récupérée.

14. RECYCLER UNE TONNE NE DIT PAS CE QU'ELLE DEVIENT

Le métal donne facilement l'image d'un cercle parfait. On fond une vieille pièce. On en fabrique une nouvelle. Dans certaines chaînes, cette circularité peut effectivement être élevée. Mais les matériaux automobiles sont souvent alliés, revêtus, collés, assemblés ou mélangés. La Commission européenne souligne que les métaux récupérés sur véhicules hors d'usage peuvent ne pas avoir une qualité suffisante pour certains usages à haute valeur et que la part de plastiques automobiles réellement recyclée reste faible.[14]

Les plastiques illustrent particulièrement le problème. Ils regroupent de nombreuses familles de polymères, des charges, des renforts, des peintures, des mousses et des assemblages multimatériaux. Une pièce en plastique n'est donc pas automatiquement une réserve de résine prête à redevenir la même pièce. Le recyclage peut être une boucle. Il peut aussi être une cascade : un matériau de haute spécification devient un produit exigeant moins de performances, puis un autre, avant

de sortir définitivement du système. Ce n'est pas nécessairement inutile. Mais appeler toutes ces trajectoires « recyclage » sans préciser leur qualité masque la question essentielle : combien de matière primaire remplaçons-nous réellement ?

15. LE DROIT EUROPÉEN REMONTE DÉSORMAIS JUSQU'À LA CONCEPTION

Pendant longtemps, la politique de fin de vie pouvait être comprise principalement comme une politique de déchets : collecter l'épave, dépolluer, démonter, recycler. Le nouveau règlement européen adopté en 2026 change l'échelle. Il porte explicitement sur les exigences de circularité de la conception du véhicule et sur sa gestion en fin de vie.[5] Le plastique fournit l'exemple le plus concret.

Pour les nouveaux modèles homologués à partir du 1er septembre 2032, au moins 15 % du plastique devra provenir de déchets plastiques post-consommation recyclés. À partir du 1er septembre 2036, l'objectif passera à 25 %. Au moins 20 % de la quantité de plastique recyclé requise devra provenir de véhicules hors d'usage ou de pièces retirées de véhicules pendant leur phase d'utilisation.[5][6] Le règlement prévoit aussi de futurs objectifs pour d'autres matières comme l'acier et l'aluminium, ainsi que davantage d'information sur la composition et la circularité du véhicule.[5] La logique change alors.

Il ne suffit plus de demander au recycleur de faire mieux avec l'objet qu'il reçoit. Il faut demander au concepteur si l'objet qu'il fabrique permettra réellement de démonter, identifier, séparer et réincorporer ses matières. C'est la même transformation que nous avons rencontrée avec la réparabilité. Un coût futur devient une contrainte de conception présente.

16. LE PNEU APRÈS LE PNEU : RÉEMPLOI, RECHAPAGE, RECYCLAGE ET ÉNERGIE

Le pneu résume presque tout le chapitre. Avant d'être retiré, il a déjà perdu une partie de sa matière par abrasion. Une fois retiré, il n'a pas forcément atteint sa fin. Un pneu encore utilisable peut être revendu. Une carcasse suffisamment saine peut être rechapée : on conserve la structure du pneu et on renouvelle sa bande de roulement. Le bénéfice n'est toutefois pas automatique : il dépend de la durée obtenue, de la performance du pneu rechapé et de l'usage réel.

Lorsque le pneu est réellement en fin de vie, il peut être transformé en fractions de caoutchouc, d'acier et de fibres, utilisé dans certains travaux ou orienté vers une récupération énergétique selon les filières. Les données publiées par l'industrie européenne du pneu indiquent qu'environ 3,9 millions de tonnes de pneus en fin de vie ont été générées en Europe en 2024, avec un taux de traitement revendiqué proche de 97 %.[10] Ce chiffre est impressionnant. Il faut pourtant lui poser la même question qu'à la voiture.

Traité comment ? Réemployer une carcasse, recycler le caoutchouc, utiliser une fraction en génie civil et brûler un pneu dans une installation industrielle ne conservent pas la même chose. Le taux de collecte est donc une condition nécessaire. Il ne suffit pas à démontrer une boucle fermée du pneu vers le pneu.

17. UNE MONTAGNE DE PNEUS EN FEU N'EST PAS LA FIN NORMALE D'UN PNEU

L'image est devenue presque symbolique du déchet automobile : des milliers de pneus empilés, une fumée noire, parfois un incendie qui dure des jours. Le danger est réel. L'EPA américaine documente depuis longtemps les risques associés

aux grands stocks de pneus : fumées, huiles issues de la combustion, contamination des sols, des eaux de surface et des eaux souterraines.[11] Mais il serait faux de transformer cette image en destination normale de tous les pneus usagés.

Un incendie de stock est précisément une défaillance de collecte, de stockage ou de gouvernance. Il faut aussi distinguer cet incendie ouvert d'une utilisation contrôlée comme combustible dans une installation conçue pour cela. Dans les deux cas le pneu brûle. Mais le contexte technique, le contrôle des émissions et la fonction recherchée n'ont rien d'équivalent. Cette distinction est importante parce qu'un livre critique peut perdre en précision exactement au moment où une image spectaculaire semble lui donner raison.

18. AIRLESS : SUPPRIMER LA CREVAISON NE SUPPRIME PAS L'USURE

Le pneu sans air paraît offrir une sortie élégante au problème. Plus de pression à surveiller. Plus de crevaison classique. Moins d'immobilisation pour certaines flottes. Michelin teste UPTIS sur des véhicules légers en conditions réelles, notamment pour des usages de livraison. Bridgestone développe de son côté AirFree et mène des démonstrations sur route, avec des usages ciblés de mobilité locale.[12][13]

Ces projets sont techniquement réels. Ils ne sont pas pour autant, en 2026, le remplacement généralisé du pneu de voiture particulière. Surtout, l'absence d'air ne supprime pas la bande de roulement. Cette bande doit toujours produire de l'adhérence au contact du sol. Elle continue donc à subir de l'usure. Le pneu sans air résout un mode de panne.

Il peut réduire certaines mises au rebut prématurées liées à la perte de pression ou à la perforation. Mais il ne supprime ni

le besoin de matériau, ni le problème du contact, ni la question de la fin de vie. C'est un excellent exemple de ce que fait réellement l'innovation : elle déplace les contraintes plus souvent qu'elle ne les abolit.

19. LE BON INDICATEUR N'EST PEUT-ÊTRE PAS LE TAUX DE RECYCLAGE

Nous pouvons maintenant revenir à la voiture entière. Supposons deux véhicules. Le premier utilise beaucoup de matière primaire, reste difficile à réparer, remplace plusieurs sous-ensembles pendant sa vie, puis affiche un excellent taux de recyclage à la casse. Le second utilise moins de matière primaire, reste plus longtemps en service, conserve davantage de pièces par réparation et remanufacturing, puis obtient un taux de recyclage final légèrement inférieur.

Lequel est le plus circulaire ? Le taux de recyclage seul ne permet pas de répondre. Il faut connaître la quantité de matière primaire mobilisée, la durée du service rendu, les remplacements intermédiaires, la quantité de fonction conservée et la qualité des matières secondaires récupérées. La question centrale devient alors très proche de celle qui traverse tout ce livre : où avons-nous placé l'optimum ?

Si chaque acteur optimise son étape, le fabricant peut réduire son coût, le propriétaire peut remplacer la pièce la moins chère, le recycleur peut maximiser son tonnage et chacun obtenir localement un bon résultat. Pourtant le cycle complet peut mobiliser plus de matière qu'une autre architecture. Une automobile matériellement sobre ne serait donc pas seulement une voiture légère ou très recyclable.

Ce serait une voiture capable de rendre le service demandé avec peu de matière primaire, de garder longtemps en fonction

ce qui a coûté cher à fabriquer, de remplacer localement ce qui s'use, puis de restituer en fin de vie des matières suffisamment propres pour redevenir utiles.

20. LA MATIÈRE FINIT TOUJOURS QUELQUE PART

L'énergie du chapitre précédent se dissipait dans l'air, les freins, les pneus et la chaleur. La matière, elle, ne disparaît pas. Elle change de forme et de propriétaire. Elle devient une carrosserie, une pièce détachée, une particule de pneu, un disque usé, une carcasse rechapée, une tonne de ferraille, un granulé de polymère, un combustible, un résidu de broyage ou un véhicule d'occasion parti sur un autre continent.

La qualité du système dépend donc moins de notre capacité à faire disparaître le déchet que de notre capacité à suivre ces transformations. Que conservons-nous ? Que détruisons-nous ? Que remettons-nous réellement en boucle ? Que déplaçons-nous seulement ailleurs ? Et combien de matière neuve faut-il injecter pour que le service continue ? Ces questions dépassent déjà la voiture comme objet. Car l'automobile ne mobilise pas seulement de l'acier, du plastique et du caoutchouc.

Elle mobilise aussi des routes, des parkings, des stations, des mines, des ports, des ateliers, des centres de traitement et de l'espace urbain. Après avoir suivi la matière dans la voiture, il faut maintenant regarder ce que la voiture fait au territoire.

NOTES ET SOURCES

[1] Joint Research Centre, Sustainable use of Materials through Automotive Remanufacturing to boost resource efficiency in the road Transport system (SMART), 2021. Le rapport compare plusieurs nomenclatures de véhicules et souligne la rareté des inventaires complets et transparents.

[2] International Energy Agency, Material Efficiency in Clean Energy Transitions, 2019. Le rapport analyse notamment les arbitrages entre acier, aluminium, plastiques/composites, rendements de fabrication, réemploi et allègement dans la chaîne automobile.

- [3] [OECD, Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport, 2020. Synthèse des émissions liées aux pneus, freins, chaussées et remises en suspension, avec discussion de la masse et des différences entre motorisations.](#)
- [4] [Eurostat, End-of-life vehicle statistics, données 2023 publiées dans l'édition 2026 : environ 4,3 millions de véhicules légers déclarés hors d'usage, 5,0 millions de tonnes, 88,3 % de réemploi/recyclage et 93,7 % de réemploi/valorisation.](#)
- [5] [Règlement \(UE\) 2026/1738 relatif aux exigences de circularité applicables à la conception des véhicules et à la gestion des véhicules hors d'usage.](#)
- [6] [Conseil de l'Union européenne, adoption des règles pour un secteur automobile plus circulaire, 2026 : contenu recyclé des plastiques, responsabilité des producteurs, traçabilité et exportation des véhicules hors d'usage.](#)
- [7] [Conseil de l'Union européenne, Euro 7, adoption 2024 : le cadre couvre notamment les particules de frein et l'abrasion des pneus.](#)
- [8] [United Nations Environment Programme, Used Vehicles and the Environment: Update and Progress 2024, sur les flux internationaux de véhicules légers d'occasion et leur réglementation.](#)
- [9] [Zhang, Matsubae & Nakajima, "Impact of remanufacturing on the reduction of metal losses through the life cycles of vehicle engines", Resources, Conservation & Recycling, 2021.](#)
- [10] [ETRMA / Tyres Europe, données européennes de filière sur les pneus usagés et les pneus en fin de vie, dont environ 3,9 Mt d'ELT en 2024 et un taux de traitement revendiqué proche de 97 %. Source industrielle, utilisée comme telle.](#)
- [11] [U.S. Environmental Protection Agency, Scrap Tire Cleanup Guidebook, sur les risques environnementaux liés aux grands stocks et incendies de pneus.](#)
- [12] [Michelin, documentation UPTIS et essais de technologie airless sur route. Source constructeur ; utilisée pour le statut de développement et les caractéristiques déclarées, non comme preuve indépendante d'un bénéfice environnemental global.](#)
- [13] [Bridgestone, documentation AirFree et démonstrations sur route. Source constructeur ; utilisée pour le statut de développement et les caractéristiques déclarées.](#)
- [14] [Commission européenne, End-of-Life Vehicles, synthèse de l'état du recyclage automobile : qualité limitée d'une partie des métaux secondaires et faible recyclage des plastiques issus des VHU.](#)
- [15] [Joint Research Centre, Initial analysis of selected measures to improve the circularity of critical raw materials and other materials in passenger cars, 2023.](#)

CHAPITRE 7 — LA VOITURE FABRIQUE SON TERRITOIRE

OUVERTURE — LE TRAJET QUI N’EXISTAIT PAS ENCORE

Une famille s’installe à trente kilomètres de son lieu de travail. Le logement est plus grand, le terrain moins cher, l’environnement plus calme. Le trajet semble acceptable : une demi-heure en voiture lorsque la circulation est fluide. Quelques années plus tard, un supermarché ouvre près d’un échangeur. Un cabinet médical déménage vers une zone plus accessible en voiture. Une entreprise s’installe sur un terrain moins cher en périphérie. Les enfants fréquentent un établissement à plusieurs kilomètres. Les proches eux-mêmes se dispersent.

La voiture a d’abord permis d’habiter plus loin. Puis le fait d’habiter plus loin a rendu la voiture nécessaire. C’est cette boucle qui nous intéresse. Une automobile n’est pas seulement une machine qui se déplace dans un territoire déjà donné. Elle change ce qu’il devient rationnel de construire, où il devient possible de vivre, à quelle distance on peut chercher un emploi, un commerce ou un service, et combien d’espace on accepte de consacrer au déplacement et au stationnement.

Le territoire, en retour, modifie la voiture elle-même comme nécessité sociale. La question n’est donc pas : « la voiture est-elle utile ? » Elle l’est manifestement pour de nombreux usages. La question est plus difficile : pour quels usages la voiture répond-elle à une géographie préexistante, et quels usages sont devenus nécessaires parce que cette géographie s’est progressivement organisée autour d’elle ?

1. UNE ROUTE N'APPARTIENT PAS À LA VOITURE

Avant d'aller plus loin, il faut retirer une simplification. Une route n'est pas une infrastructure exclusivement destinée à la voiture particulière. Elle sert aussi les poids lourds, les véhicules utilitaires, les autocars, les bus, les secours, les artisans, les livraisons, les services publics et l'agriculture. En France, en 2024, les véhicules particuliers représentent environ 82 % du transport intérieur de voyageurs mesuré en voyageurs-kilomètres. Pour les marchandises, les poids lourds français et étrangers représentent ensemble près de neuf dixièmes des tonnes-kilomètres terrestres comptabilisées par le SDES.[12]

Cela montre à la fois l'importance de la route et l'impossibilité de l'attribuer à un seul usage. Dire que « les routes sont payées pour les voitures » serait donc trop grossier. Mais l'erreur inverse serait de considérer que la forme du réseau, sa capacité, sa largeur, ses échangeurs, ses aires, ses normes de stationnement et l'espace qui lui est consacré seraient indépendants de l'automobile de masse. L'enjeu du chapitre n'est pas de chercher un coupable unique. Il est de comprendre comment un système multi-usages peut malgré tout être profondément structuré par le volume et les caractéristiques d'un mode dominant.

2. UNE INFRASTRUCTURE PEUT TRANSFORMER LA DEMANDE QU'ELLE ÉTAIT CENSÉE ABSORBER

L'intuition la plus simple de l'ingénierie routière est séduisante. Il y a trop de circulation. On augmente la capacité. Le trafic se répartit sur davantage de voies. La congestion baisse. À très court terme, ce mécanisme peut fonctionner. Une voie nouvelle peut supprimer un goulet d'étranglement réel, sécuriser une insertion ou améliorer la fiabilité d'un itinéraire.

Mais ce raisonnement suppose que la quantité de déplacements reste fixe. Or un déplacement a un coût en temps, en argent, en incertitude et en fatigue. Si une infrastructure réduit ce coût, des trajets qui n'étaient pas jugés intéressants peuvent le devenir. Un automobiliste peut changer d'itinéraire. Un autre peut revenir à une heure auparavant évitée.

Un déplacement qui se faisait ailleurs peut se reporter sur cette route. Un ménage peut accepter un logement plus éloigné. Une entreprise peut choisir un terrain périphérique. Une amélioration de capacité ne répond donc pas seulement à une demande. Elle modifie les conditions dans lesquelles cette demande se forme.

3. LA DEMANDE INDUITE N'EST NI UN MYTHE NI UNE LOI MAGIQUE

Les travaux de Gilles Duranton et Matthew Turner sont devenus une référence parce qu'ils ont observé, dans les villes américaines étudiées, une relation remarquable entre kilomètres-voies autoroutiers et véhicules-kilomètres parcourus. Pour les Interstate Highways, leur étude trouve une augmentation approximativement proportionnelle du trafic à celle de la capacité.[3] Ils identifient plusieurs mécanismes : davantage de conduite par les habitants déjà présents, développement d'activités intensives en transport et arrivée de nouveaux résidents. Ce résultat est important.

Il ne doit pas être transformé en formule universelle. Le Department for Transport britannique a précisément réexaminé la littérature sur la demande induite en 2018, puis publié en mai 2026 un travail consacré à l'effet de la capacité nouvelle sur la demande et sur l'évaluation économique des projets.[1][2] Le résultat général est moins spectaculaire mais plus solide : de la demande supplémentaire apparaît souvent, parfois de manière

importante, mais son ampleur dépend du contexte, de la congestion initiale, des alternatives disponibles, de la demande refoulée et de l'horizon considéré. Une autoroute saturée dans une grande aire métropolitaine n'est pas une départementale rurale. Une déviation qui retire un trafic de transit d'un centre-bourg n'a pas la même fonction qu'un élargissement d'une pénétrante urbaine. La demande induite est donc une contrainte d'analyse, pas un slogan.

4. DÉSENGORGER AUJOURD'HUI PEUT RECONFIGURER DEMAIN

Cette distinction de temporalité explique un paradoxe fréquent. Une infrastructure peut être très appréciée à son ouverture et décevoir dix ans plus tard. Au début, les temps de parcours baissent réellement. Puis le nouvel avantage se diffuse dans les décisions ordinaires. Un lotissement apparaît plus loin. Des commerces se déplacent vers un échangeur. Un emploi situé à quarante kilomètres devient acceptable.

Certains trajets en transport collectif deviennent moins compétitifs parce que les destinations se dispersent. Le système finit alors par consommer une partie de la capacité qu'il vient de créer. Cela ne signifie pas que l'infrastructure n'a produit aucun bénéfice. Elle a pu améliorer l'accès à des emplois, réduire un détour, fluidifier du fret ou ouvrir une zone jusqu'à mal desservie. Mais son évaluation ne peut pas s'arrêter au trafic du jour de l'inauguration. Elle doit intégrer les décisions que la nouvelle accessibilité rend possibles.

5. LA VOITURE AGRANDIT LE TERRITOIRE ACCESSIBLE

Pendant une grande partie de l'histoire, le temps de déplacement limitait fortement la taille du territoire quotidien. Travailler, commercer, se soigner ou rendre visite supposait une proximité compatible avec la marche, l'animal, le rail ou des

transports collectifs organisés selon certains axes. La voiture change cette géométrie. Elle combine départ à la demande, trajet porte à porte, vitesse relativement élevée et capacité à desservir des destinations dispersées.

Une distance autrefois dissuasive peut devenir banale. L'OCDE identifie justement le progrès automobile et les investissements routiers parmi les facteurs qui ont abaissé le coût réel de la distance et contribué à l'étalement urbain, aux côtés des revenus, des préférences résidentielles, des règles d'urbanisme et de la géographie.[4] Cette précision est importante. La voiture n'a pas « créé » seule le périurbain.

Des ménages ont recherché plus d'espace, des collectivités ont ouvert des terrains, des prix immobiliers ont poussé vers l'extérieur, des règles ont limité certaines densités, des entreprises ont cherché de grandes parcelles. Mais l'automobile a rendu ces choix beaucoup plus praticables.

6. PUIS LE TERRITOIRE REND LA VOITURE NÉCESSAIRE

La causalité repart ensuite dans l'autre sens. Un habitat dispersé fournit moins de voyageurs potentiels par arrêt. Un commerce entouré de parkings et situé en bordure d'une voie rapide est plus facile à desservir en voiture qu'à pied. Des emplois répartis entre plusieurs zones d'activité rendent les flux moins compatibles avec une ligne de transport collectif simple.

Une école, un médecin ou un service public plus éloigné augmente la distance minimale à parcourir. L'ITF décrit ce type de boucle lorsqu'il traite la dépendance automobile : la motorisation, la planification, l'allocation de l'espace, le stationnement et le développement dispersé peuvent se renforcer mutuellement.[5] À ce stade, demander à un individu de « choisir un autre mode » peut devenir presque vide de sens.

Un choix réel suppose une alternative qui existe, qui va dans la bonne direction, à une heure utile, pour un coût et un temps acceptables. La dépendance automobile n'est donc pas l'inverse de la liberté. Elle peut précisément apparaître lorsqu'un système qui offrait initialement plus de liberté de localisation réduit ensuite le nombre d'alternatives praticables.

7. LE MÊME PAYS CONTIENT PLUSIEURS RÉGIMES DE MOBILITÉ

Les moyennes nationales masquent cette géographie. En 2019, la voiture représente 63 % des déplacements locaux en France.[7] Mais hors unité urbaine, elle est utilisée pour environ quatre déplacements sur cinq. Dans l'agglomération parisienne, la structure est presque inverse : la marche devient le premier mode et les transports collectifs occupent une place majeure. Ces différences ne viennent pas seulement de préférences culturelles.

La densité, la distance, la fréquence des transports, la continuité des trottoirs, la présence de commerces, la concentration des emplois et la disponibilité du stationnement rendent certains choix faciles et d'autres coûteux. C'est pourquoi une politique pensée pour un centre dense peut être absurde dans un territoire rural. Et inversement, une norme construite à partir du rural peut gaspiller énormément d'espace dans un centre urbain où les alternatives sont nombreuses.

8. LE RURAL ET LE PÉRIURBAIN PARCOURENT UNE AUTRE GÉOGRAPHIE

Le Cerema donne une mesure concrète de cette polarisation. Dans les territoires périurbains et ruraux étudiés par le projet Updateperriurb, les résidents parcourent en moyenne plus de 32 kilomètres en voiture par personne et par jour. La moyenne

nationale est de 21,6 kilomètres. Dans les grands centres urbains, elle tombe à 12,2 kilomètres.[8]

Ces chiffres incluent les personnes qui ne conduisent pas et même celles qui ne se déplacent pas ce jour-là. Un conducteur régulier parcourt donc en moyenne davantage. Entre 2008 et 2019, le volume de kilomètres automobiles a diminué dans les grands centres, mais augmenté ailleurs. Le territoire ne produit donc pas seulement plus ou moins de voitures. Il produit des quantités très différentes de distance automobile nécessaire au quotidien.

9. QUAND L'ACCESSIBILITÉ DEVIENT UNE FACTURE DE CARBURANT

Cette distance finit par apparaître dans le budget. L'Insee estime qu'en 2021, 2,2 millions de ménages propriétaires d'une voiture ont dépensé plus de l'équivalent d'un mois de revenu annuel en carburant.[9] Cela représente 10,6 % des ménages motorisés. Dans les intercommunalités rurales, la proportion atteint 13,5 %, contre 9,0 % dans les intercommunalités urbaines.

Dans le rural éloigné des agglomérations, environ un ménage véhiculé sur six est concerné. Le prix du carburant compte évidemment. Mais l'étude montre aussi le rôle des distances domicile-travail, de la proximité des services et de la présence de transports collectifs. La facture énergétique est donc aussi une facture d'aménagement. Un ménage peut réduire sa vitesse, choisir un véhicule plus sobre ou covoiturer. Il ne peut pas rapprocher seul son employeur, son médecin, son école ou son supermarché.

10. ALLER PLUS LOIN N'EST PAS TOUJOURS ACCÉDER À DAVANTAGE

C'est ici que la distinction entre mobilité et accessibilité devient essentielle. La mobilité décrit le mouvement. Combien de kilomètres ? Combien de trajets ? Combien de minutes ? L'accessibilité décrit ce que ce mouvement permet d'atteindre. Peut-on trouver un emploi acceptable ? Voir un médecin ? Faire ses courses ? Suivre une formation ? Rendre visite à un proche ? L'ITF recommande précisément de penser l'accessibilité au-delà du seul transport, en intégrant usage des sols, aménagement et situation des populations vulnérables ou éloignées.[6]

Deux territoires peuvent donc afficher la même mobilité moyenne avec des qualités d'accès très différentes. Dans l'un, dix kilomètres donnent accès à presque tout. Dans l'autre, trente kilomètres sont nécessaires pour accomplir les mêmes fonctions. Un système peut donc produire davantage de kilomètres tout en offrant moins de choix.

11. LA VOITURE IMMOBILE OCCUPE AUSSI LE TERRITOIRE

Nous raisonnons souvent sur la voiture lorsqu'elle roule. Elle passe pourtant l'essentiel de son existence arrêtée. Il faut donc fournir une place à proximité du logement, souvent une autre à proximité du travail, puis des places devant les commerces, équipements et loisirs. Le stationnement devient ainsi une infrastructure foncière. L'OCDE et l'ITF montrent que sa disponibilité et son prix influencent le choix modal et la forme urbaine.[10][11]

Les obligations minimales de stationnement sont particulièrement instructives. Elles peuvent imposer aux logements ou aux commerces de construire un certain nombre de places avant même que la demande réelle soit connue. Le coût n'apparaît alors pas nécessairement comme un « coût

automobile ». Il peut être intégré au prix du logement, au loyer commercial ou au coût d'un bâtiment. Et dans les zones où le foncier est très cher, consacrer de l'espace à une voiture immobile signifie renoncer à un autre usage possible de ce même espace.

12. UN MILLION DE KILOMÈTRES DE PATRIMOINE ROUTIER

La France possède plus d'un million de kilomètres de routes. Le Cerema recense environ 715 000 kilomètres de routes communales et intercommunales et environ 383 000 kilomètres départementaux, auxquels s'ajoutent le réseau national et les autoroutes.[14] Cette longueur dit quelque chose que les débats sur les voitures neuves oublient souvent. Le système automobile repose sur un patrimoine ancien, déjà construit.

Une route doit être inspectée, entretenue, réparée, sécurisée, déneigée ou adaptée aux aléas, indépendamment du fait que les voitures qui la parcourent soient thermiques ou électriques. Cette infrastructure a évidemment d'autres fonctions que la voiture. Mais elle crée aussi une inertie. Lorsqu'un territoire s'est organisé autour d'un réseau vaste et d'activités dispersées, il devient coûteux de changer rapidement la géographie de l'accès.

13. LE SYSTÈME ROUTIER CONTINUE À RECEVOIR DES INVESTISSEMENTS IMPORTANTS

Le patrimoine n'est pas seulement entretenu. Il continue à être transformé. En 2024, le SDES chiffre les investissements dans le réseau routier à environ 12,2 milliards d'euros, soit 46 % des investissements en infrastructures de transport de l'année. [12] Les réseaux départementaux et communaux, qui constituent l'immense majorité de la longueur routière

française, concentrent plus des trois quarts des investissements routiers.

Ces montants ne prouvent pas qu'une dépense est bonne ou mauvaise. Une route peut devoir être réparée pour des raisons de sécurité. Un pont peut être indispensable au fret et aux secours. Une déviation peut améliorer radicalement la vie d'un village. Mais ils rappellent que le territoire automobile n'est pas un décor gratuit. Il est continuellement reproduit par de l'investissement public et privé.

14. QUI PAIE QUOI ? LA QUESTION N'A PAS UN SEUL COMPTE

Le débat devient rapidement confus lorsqu'on demande si « les automobilistes paient leurs routes ». En 2024, les principales recettes publiques liées au transport atteignent 66,0 milliards d'euros, dont 29,6 milliards de TICPE.[12] Les dépenses publiques consolidées liées au transport atteignent 78,7 milliards d'euros tous modes confondus. Soustraire le second chiffre au premier ne donne pas le « déficit de la voiture ».

Certaines recettes viennent d'autres usagers ou producteurs. Certaines taxes automobiles ne sont pas affectées aux routes. Les dépenses couvrent le ferroviaire, les transports collectifs et d'autres fonctions. Les routes servent plusieurs usages. Et certaines dépenses de voirie locale ne sont même pas observées de façon exhaustive dans les mêmes comptes. La DGCL chiffre par exemple à 13,3 milliards d'euros les dépenses de voirie de 2023 sur le champ des collectivités qui ventilent suffisamment leurs dépenses, mais précise que les petites communes ne permettent pas d'obtenir un total complet pour toute la voirie locale.[13] La bonne méthode consiste donc à construire plusieurs comptes séparés, pas à faire s'affronter deux gros nombres.

15. UNE DÉPENSE PUBLIQUE N'EST PAS UNE EXTERNALITÉ

Il faut encore séparer une autre catégorie. Une externalité est un coût qui n'est pas entièrement supporté par celui qui le produit. Pollution de l'air, bruit, climat, certains accidents, congestion ou dommages aux habitats peuvent entrer dans cette logique selon les conventions utilisées. La Commission européenne estimait en 2019 les coûts externes de l'ensemble des transports de l'UE-28 autour de 1 000 milliards d'euros par an.[15]

Ce chiffre ne doit pas être recopié comme une estimation actuelle 2026. Il sert ici à montrer l'échelle et surtout la catégorie. Une route financée par l'impôt est une dépense budgétaire. Un dommage sanitaire non payé directement par le pollueur est une externalité. Un péage est une tarification d'usage. Une taxe sur le carburant est une recette fiscale. Un bénéfice d'accessibilité pour un territoire est encore autre chose. Mélanger ces catégories permet de défendre presque n'importe quelle conclusion.

16. L'ÉTALEMENT ALLONGE AUSSI LES AUTRES RÉSEAUX

La route n'est pas la seule infrastructure qui suit les logements. L'eau, l'assainissement, l'électricité, les déchets, les services de secours, les transports collectifs et une partie des équipements publics doivent eux aussi desservir le territoire. L'OCDE conclut que la faible densité et la fragmentation augmentent souvent les coûts par habitant de plusieurs services, parce que davantage de longueur de réseau dessert moins d'usagers.[4] Cela ne signifie pas que toute maison éloignée serait une erreur économique.

Des territoires peu denses ont des fonctions agricoles, industrielles, touristiques ou résidentielles réelles. Mais cela signifie que le prix du foncier plus faible à l'achat n'épuise pas

toujours le coût collectif de la distance. Une forme urbaine est aussi une architecture de réseaux.

17. LE RURAL INTERDIT LES SOLUTIONS UNIVERSELLES

La critique de la dépendance automobile devient facile si elle oublie le territoire qui la produit. Dans une zone dense, un métro, un tramway, un bus fréquent, la marche et le vélo peuvent se compléter. Dans un espace de faible densité, reproduire la même fréquence vers toutes les destinations exigerait énormément de véhicules et de conducteurs pour transporter peu de personnes.

La voiture peut donc rester rationnelle pour de nombreux trajets ruraux. Cela ne signifie pas que rien ne peut changer. Le covoiturage peut augmenter le service rendu par un véhicule existant. Le transport à la demande peut couvrir certains publics ou horaires. Un vélo électrique peut remplacer des trajets courts pour une partie des personnes. Des services rapprochés réduisent le besoin de déplacement.

Le télétravail peut supprimer certains allers-retours. Un pôle de rabattement peut combiner voiture et transport collectif. Et une automobile plus légère peut réduire matière et énergie sans demander la disparition de la mobilité individuelle. La question sérieuse n'est donc pas : « faut-il encore des voitures ? » Elle est : quelle combinaison rend l'accès le plus robuste et le moins coûteux pour ce territoire précis ?

18. LA VRAIE QUESTION : QUELS USAGES EXIGENT UNE VOITURE, ET LESQUELS ONT ÉTÉ FABRIQUÉS PAR LE TERRITOIRE ?

Nous pouvons maintenant reformuler la boucle. La voiture rend une distance acceptable. Cette distance permet une nouvelle localisation. La nouvelle localisation augmente la

distance moyenne entre les fonctions. Cette distance rend les alternatives moins compétitives. La voiture devient alors plus nécessaire qu'au début. La technologie qui avait élargi le choix contribue ainsi à structurer un monde dans lequel certains choix deviennent difficiles à retirer.

Ce résultat ne condamne pas l'automobile. Il change simplement l'échelle à laquelle il faut l'optimiser. Une voiture peut être extrêmement efficace en tant que machine et participer à un système territorial qui produit beaucoup de kilomètres. À l'inverse, une voiture moins efficiente peut rendre un service social important là où aucune autre solution raisonnable n'existe. Le bon indicateur n'est donc pas le nombre de déplacements, ni même la quantité de kilomètres prise isolément.

C'est l'accessibilité obtenue : combien de personnes peuvent réellement atteindre ce dont elles ont besoin, avec combien de temps, de matière, d'énergie, d'argent, d'espace et de dépendance imposée ? Le chapitre suivant changera encore d'échelle. Après le territoire, il faudra regarder le travail. Car l'automobile n'a pas seulement organisé des routes et des distances. Elle a organisé des usines, des métiers, des migrations, des sous-traitants et des bassins d'emploi.

NOTES ET SOURCES

[1] [UK Department for Transport, How additional road capacity affects travel demand, publié le 28 mai 2026. Étude sur les effets de capacité supplémentaire, la demande induite et les conséquences pour l'évaluation des projets.](#)

[2] [UK Department for Transport, Induced travel demand: an evidence review, 2018. Revue de littérature sur l'ampleur de la demande induite et les conditions dans lesquelles elle apparaît.](#)

[3] [Gilles Duranton & Matthew A. Turner, "The Fundamental Law of Road Congestion: Evidence from US Cities", American Economic Review, 2011. Résultat situé sur les villes américaines : trafic autoroutier approximativement proportionnel aux kilomètres-voies d'Interstate.](#)

- [4] [OECD, Rethinking Urban Sprawl: Moving Towards Sustainable Cities, 2018. Analyse des causes et conséquences de l'étalement, des coûts de services publics et de la relation entre forme urbaine, route et dépendance automobile.](#)
- [5] [OECD/International Transport Forum, Reversing Car Dependency, 2021. Rapport sur l'allocation de l'espace routier, le stationnement, les alternatives à la voiture et l'intégration entre transport et usage des sols.](#)
- [6] [OECD/International Transport Forum, Sustainable Accessibility for All, 2024. Cadre d'analyse de l'accessibilité intégrant transport, aménagement, populations vulnérables et éloignement.](#)
- [7] [SDES, Enquête mobilité des personnes 2019 et page « Mobilité des personnes » mise à jour en 2026 : 63 % des déplacements locaux en voiture ; environ quatre sur cinq hors unité urbaine.](#)
- [8] [Cerema, « Dépendance à la voiture, vers une polarisation territoriale », projet ANR Updateperriurb, 2026 : plus de 32 km de voiture par jour et par résident en périurbain/rural, contre 21,6 km national et 12,2 km dans les grands centres.](#)
- [9] [Insee Première n°2125, « Les dépenses de carburant pèsent davantage sur le budget des ménages ruraux », 8 septembre 2026. Données 2021 et analyse de la sensibilité territoriale au coût du carburant.](#)
- [10] [OECD, The Environmental and Welfare Implications of Parking Policies, 2019.](#)
- [11] [OECD/ITF, Parking Prices and Availability, Mode Choice and Urban Form, 2020. Discussion des effets du prix, de l'offre et des minima réglementaires de stationnement.](#)
- [12] [SDES, Bilan annuel des transports en 2024 / Chiffres clés des transports 2026 : voyageurs-km, fret, recettes et dépenses publiques, investissements routiers.](#)
- [13] [Direction générale des collectivités locales, BIS 192, « Les dépenses de voirie des collectivités locales entre 2013 et 2023 », 2025.](#)
- [14] [Cerema, « Optimiser la gestion des réseaux routiers », chiffres du réseau routier français : plus d'un million de kilomètres, dont environ 715 000 km communaux/intercommunaux et 383 000 km départementaux.](#)
- [15] [Commission européenne, travaux sur l'internalisation des coûts du transport et premières estimations européennes publiées en 2019 ; estimation d'environ 1 000 Md€ de coûts externes annuels pour l'ensemble des transports de l'UE-28.](#)

CHAPITRE 8 — LE TRAVAIL QUE L'AUTOMOBILE ORGANISE

OUVERTURE — LA MÊME VOITURE, DES TRAVAILLEURS DIFFÉRENTS

Une chaîne automobile peut produire davantage de voitures avec moins d'ouvriers qu'hier. Elle peut employer davantage de techniciens, d'informaticiens ou de spécialistes de maintenance. Elle peut sous-traiter une partie de ce qui était auparavant réalisé dans l'usine. Elle peut assembler en France des composants fabriqués ailleurs, ou concevoir en France un véhicule produit à l'étranger. Elle peut aussi recruter massivement une catégorie de travailleurs pendant vingt ans, puis changer de régime industriel au point de ne plus avoir besoin des mêmes postes.

Le produit final reste une automobile. Le travail qui la rend possible, lui, peut être profondément différent. C'est pourquoi l'histoire sociale de l'automobile ne peut pas être réduite à une courbe d'effectifs. Il faut regarder comment le système découpe les tâches, qui il recrute, quelles qualifications il valorise, où il installe la production, ce qu'il automatise, ce qu'il externalise et quels territoires deviennent dépendants de cette organisation. La question centrale du chapitre sera donc moins : « combien d'emplois l'automobile crée-t-elle ? » que : « quel régime de travail crée-t-elle, pour qui, où, et que devient ce régime lorsqu'un nouvel optimum industriel apparaît ? »

1. PRODUIRE EN MASSE, C'EST D'ABORD DÉCOUPER LE TRAVAIL

La production de masse ne repose pas seulement sur une machine plus rapide. Elle repose sur une manière d'organiser le travail. Pour augmenter les cadences, on décompose les opérations, on stabilise les gestes, on synchronise les postes et on sépare davantage les fonctions de conception, de réglage, d'entretien et d'exécution. Dans l'automobile française d'après-guerre, cette logique donne une place centrale à l'ouvrier spécialisé, l'OS.

Le terme est trompeur pour un lecteur contemporain. L'OS n'est pas « spécialiste » au sens d'une qualification élevée. Il est spécialisé dans une opération déterminée, répétée à cadence industrielle, et classé plus bas que l'ouvrier professionnel dans les hiérarchies de qualification de l'époque. La voiture de masse suppose donc aussi un travail de masse : beaucoup d'opérations simples, coordonnées par une organisation qui concentre ailleurs la définition du procédé. Cette architecture n'est pas seulement technique. Elle produit une structure sociale de l'usine.

2. L'AUTOMOBILE RECRUTE DANS UNE POLITIQUE NATIONALE DE MAIN-D'ŒUVRE

Après 1945, la France manque de bras dans plusieurs secteurs. La reconstruction, l'industrialisation et la croissance mobilisent bâtiment, mines, sidérurgie, agriculture, transports et industries manufacturières. L'ordonnance du 2 novembre 1945 crée l'Office national d'immigration, chargé d'organiser une partie de l'introduction de travailleurs étrangers.[1] L'automobile s'inscrit dans ce système. Elle recrute massivement, notamment pour les postes les plus pénibles et les moins valorisés des ateliers.

Mais elle n'est ni le seul secteur demandeur ni la cause unique de l'immigration française. Cette distinction est indispensable. Écrire que « l'automobile a créé l'immigration » transformerait un système historique complexe en causalité unique. Écrire qu'elle a constitué l'un des grands pôles d'emploi de cette immigration ouvrière permet au contraire de mesurer son rôle réel sans lui attribuer tout le phénomène.

3. QUAND LES ENTREPRISES VONT ELLES-MÊMES CHERCHER DES TRAVAILLEURS

Le recrutement n'est pas seulement une rencontre spontanée entre une usine française et une population déjà arrivée. Certaines entreprises participent directement à l'organisation des flux de main-d'œuvre. Les auditions de l'Assemblée nationale consacrées aux immigrés âgés rappellent que Citroën utilise des recruteurs au Maroc et que Renault met en place une antenne de recrutement à Alger au milieu des années 1950.[2] La frontière entre politique publique et politique d'entreprise est d'ailleurs particulièrement intéressante chez Renault.

Depuis janvier 1945, les usines Renault sont nationalisées et la Régie nationale des usines Renault constitue un établissement industriel et commercial placé sous l'autorité et le contrôle de l'État.[14] Parler d'un constructeur privé d'un côté et de l'État de l'autre serait donc, pour une grande partie de la période, factuellement faux. L'État définit une politique migratoire et industrielle ; l'entreprise organise une partie de ses recrutements ; les deux logiques se rencontrent dans un même besoin productif. Cela ne signifie pas que les travailleurs seraient simplement « déplacés » par ces institutions. Ils conservent leurs propres projets, arbitrages et trajectoires. Mais l'existence de canaux de recrutement organisés montre que la

structure industrielle contribue activement à déterminer où elle cherche sa main-d'œuvre.

4. L'OS EST AUSSI UNE SEGMENTATION SOCIALE

Tous les ouvriers recrutés n'occupent pas les mêmes positions. Les travaux de Laure Pitti sur Renault-Billancourt montrent qu'au début des années 1950 environ 75,5 % des ouvriers algériens du cas étudié sont classés OS.[4] Le rapport parlementaire sur les immigrés âgés cite une étude de carrière portant sur 993 ouvriers algériens de Renault : trois seulement dépassent le niveau d'OS, deux devenant ouvriers qualifiés et un accédant à l'encadrement.[2] Ce chiffre n'est pas un taux national. Il n'en est pas moins révélateur d'un mécanisme.

Une entreprise peut recruter largement une population pour répondre à son besoin de main-d'œuvre tout en lui offrant très peu de mobilité dans sa propre hiérarchie. La segmentation du travail devient alors une segmentation des carrières. Le salaire, la pénibilité, la stabilité du poste, la reconnaissance de qualification et la perspective de promotion ne se distribuent pas de manière uniforme. La question de l'emploi ne peut donc pas être résumée au nombre de contrats signés.

5. BILLANCOURT : UN CAS MAJEUR, PAS UNE MOYENNE NATIONALE

Renault-Billancourt concentre une grande partie de cette histoire. En mai 1968, l'usine compte près de 21 000 ouvriers, dont environ un tiers d'étrangers selon le Musée national de l'histoire de l'immigration.[3] Au 1er janvier 1974, une étude publiée sur Persée dénombre 10 868 immigrés sur 34 113 employés dans l'établissement ; certains départements de production de l'île Seguin atteignent alors environ 70 à 80 % de

travailleurs immigrés.[5] Ces chiffres sont impressionnants. Ils doivent rester attachés à leur lieu et à leur date.

Billancourt est une usine immense, située dans une région et une période où la concentration de main-d'œuvre immigrée est particulièrement forte. Une usine de province, un atelier qualifié, un bureau d'études ou une autre décennie ne présentent pas nécessairement la même composition. Le cas est utile précisément parce qu'il rend visible un système poussé à une grande échelle, pas parce qu'il représenterait chaque usine française.

6. LES TRAVAILLEURS IMMIGRÉS MODIFIENT AUSSI LES RÈGLES DU TRAVAIL

Parler de recrutement et de segmentation comporte un risque : raconter cette histoire comme si les travailleurs n'étaient que les objets d'une organisation conçue par d'autres. Les conflits sociaux montrent l'inverse.[3,6] Les travailleurs immigrés participent aux grèves, aux syndicats, aux mobilisations de poste et à des luttes spécifiques portant sur rémunération, conditions de travail, discrimination et statut. En 1973, des ouvriers immigrés de Renault-Billancourt paralysent l'usine autour du mot d'ordre « à travail égal, salaire égal » ; le Musée de l'histoire de l'immigration indique que le mouvement obtient ensuite une grille salariale unique.[6] Le régime de travail n'est donc jamais seulement imposé.

Il est négocié, contesté, modifié. La productivité industrielle dépend de règles que les travailleurs eux-mêmes peuvent rendre politiquement et socialement instables lorsqu'ils les jugent inacceptables. Le système industriel produit des catégories de travail ; les travailleurs transforment en retour le système social de l'usine.

7. CE QUE SIGNIFIE TRAITER UNE MAIN-D'ŒUVRE COMME TEMPORAIRE

Une entreprise peut raisonner sur un besoin de production de quelques années. Une vie humaine ne se découpe pas selon le même horizon. Le rapport parlementaire consacré aux immigrés âgés souligne que les trajectoires d'ouvriers algériens chez Renault montrent souvent une ancienneté durable et que leur supposée instabilité ne suffit pas à expliquer l'absence de promotion.[2] Un travailleur recruté pour une phase d'expansion peut rester dans l'entreprise, faire venir ou construire une famille, se loger, scolariser des enfants, rejoindre un syndicat et inscrire sa vie dans un territoire.

Lorsque le besoin industriel change, ces ancrages ne disparaissent pas. C'est ici qu'apparaît une question de responsabilité que le livre ne peut résoudre par un slogan. Lorsqu'une entreprise, parfois avec l'appui de l'État, organise durablement l'arrivée et l'installation d'une main-d'œuvre parce qu'elle en a besoin, que doit-elle encore à cette population lorsque le besoin productif diminue ? La question est économique, sociale et politique. Elle ne transforme pas l'entreprise en propriétaire des trajectoires de vie. Mais elle empêche de considérer le travail comme un simple intrant qui disparaîtrait du bilan lorsque la chaîne change.

8. 1974 : LE RÉGIME D'EMPLOI SE RETOURNE

Le choc pétrolier n'explique pas à lui seul la transformation qui suit, mais il marque une rupture de contexte. En 1974, la France suspend l'introduction de nouveaux travailleurs permanents.[7] Dans l'automobile, la croissance des effectifs ralentit, les restructurations se multiplient et les technologies de production évoluent. Odile Merckling documente la baisse de la part des immigrés dans l'emploi automobile : 25,9 % en 1973,

15,8 % en 1982. Parmi les ouvriers, la part passe de 34,3 % en 1973 à 25,5 % en 1979.[8]

Il serait pourtant faux d'en tirer une causalité unique. L'arrêt de l'immigration de travail, la crise de la demande, le vieillissement de la main-d'œuvre, l'automatisation, les politiques d'entreprise et les nouvelles implantations productives agissent ensemble. Le régime qui avait cherché des ouvriers à grande échelle entre ainsi dans une phase où il cherche progressivement à produire autrement.

9. LE ROBOT NE SUPPRIME PAS SEULEMENT UN POSTE, IL REDESSINE LE MÉTIER

L'automatisation est souvent racontée comme une substitution simple. Une machine arrive. Un ouvrier disparaît. Cette image existe dans certains postes, mais elle ne suffit pas à décrire une usine. Benjamin Coriat décrit dès 1983 l'effort de robotisation et d'automatisation de la Régie Renault, avec l'introduction d'équipements flexibles, de robots et de systèmes commandés par micro-électronique.[9]

Le soudage, la peinture, la manutention ou certaines opérations de fabrication peuvent être automatisés. Mais cette automatisation crée ou augmente simultanément des besoins de maintenance, programmation, réglage, diagnostic, contrôle et conduite d'installation. Le nombre d'heures humaines peut diminuer sur une opération tout en augmentant la technicité d'autres postes. La question n'est donc pas seulement : combien de travailleurs restent ? Elle est aussi : quels savoirs deviennent nécessaires, et lesquels perdent leur valeur dans le nouveau procédé ?

10. L'AUTOMATISATION N'EXPLIQUE PAS TOUTE LA BAISSÉ DES EFFECTIFS

Reconnaître la recombinaison des compétences ne doit pas conduire à l'erreur inverse. L'automatisation réduit réellement le besoin de main-d'œuvre sur certaines opérations. Mais les effectifs d'une filière changent aussi lorsque la demande baisse, lorsqu'un constructeur externalise une fonction, lorsqu'une usine ferme, lorsqu'un modèle est produit ailleurs ou lorsqu'une organisation devient plus productive sans robot supplémentaire. Dans les années 1980, ces phénomènes se cumulent.

Les entreprises modernisent leurs usines tout en freinant les embauches, en recourant aux préretraites, en restructurant des sites et en réorganisant leurs fournisseurs. Chercher une cause unique à la contraction ouvrière produirait donc une histoire techniquement fautive. La technologie compte. Elle compte à l'intérieur d'un système économique qui change en même temps.

11. SOUS-TRAITER N'EST PAS DÉLOCALISER

Une autre confusion apparaît lorsque l'usine cesse de réaliser elle-même une opération. Si un constructeur confie un sous-ensemble à un équipementier situé cinquante kilomètres plus loin, il y a sous-traitance. Il n'y a pas nécessairement délocalisation. En 2023, l'Insee recense 1 090 sociétés donneuses d'ordre dans la filière automobile française, soit 27 % des sociétés de la filière.[11]

Parmi ces donneurs d'ordre, environ deux tiers déclarent sous-traiter uniquement en France. Les motifs les plus souvent cités sont l'accès au savoir-faire du sous-traitant, à 72 %, et à ses capacités de production, à 60 %.[11] Une chaîne de valeur peut donc devenir plus distribuée sans quitter le territoire national.

La sous-traitance transforme pourtant le travail. Elle déplace l'employeur, le lieu, le pouvoir de négociation et parfois le risque économique.

12. LE RISQUE DESCEND VERS LES FOURNISSEURS

Un constructeur peut répartir sa production entre de nombreux fournisseurs. Un fournisseur, lui, peut dépendre de quelques grands clients. Cette asymétrie devient décisive lorsque les volumes baissent ou qu'un programme change. L'Insee montre qu'entre 2010 et 2023 les fournisseurs les plus dépendants de l'automobile subissent des pertes d'emploi plus fortes et présentent un risque supérieur de fermeture ou de sortie de la filière.[10][15]

Le risque industriel n'a donc pas disparu parce que le constructeur n'emploie plus directement les travailleurs concernés. Il a été déplacé dans la chaîne. La notion d'emploi automobile doit alors inclure ce réseau de dépendances, pas seulement les badges d'accès à l'usine d'assemblage.

13. UN TIERS D'EMPLOIS MANUFACTURIERS AUTOMOBILES EN MOINS ENTRE 2010 ET 2023

La contraction récente de la filière française est massive. L'Insee estime que l'emploi des sociétés de la filière automobile manufacturière passe de 425 500 à 286 800 équivalents temps plein entre 2010 et 2023, soit une baisse de 33 %.[10] Chez les constructeurs, la baisse atteint environ 35 %. Chez les fournisseurs industriels, environ 32 %. Sur la même période, l'emploi du reste de l'industrie manufacturière est beaucoup plus proche de la stabilité.[10]

Cela interdit d'expliquer toute la baisse par une désindustrialisation française uniforme. Le secteur automobile connaît une transformation spécifique de volumes, de produits,

de géographie et d'organisation. Attention toutefois au périmètre. Les 286 800 ETP servent ici à comparer la filière manufacturière 2010-2023. Le chiffre de 329 000 salariés publié par l'Insee pour 2023 couvre une filière plus large, comprenant aussi d'autres activités liées à l'automobile.[11] Comparer directement les deux nombres sans cette distinction fabriquerait une fausse variation.

14. QUAND LA PRODUCTION CHANGE DE PAYS

L'emploi change aussi parce que la voiture n'est plus produite dans la même géographie. L'Insee estime que la part de la production des constructeurs français réalisée sur le territoire national passe d'environ 60 % en 2000 à 24 % en 2017. [13] Les groupes français développent ou renforcent des implantations en Espagne, Europe centrale et orientale, Turquie et Maghreb.[12][16] Entre 2010 et 2023, la production française recule tandis qu'elle augmente dans plusieurs pays où Renault ou PSA/Stellantis disposent d'usines.[10][16] Une partie de la baisse des besoins de travail en France se comprend donc à l'échelle internationale. Produire plus efficacement en France et produire davantage ailleurs peuvent se produire en même temps. La frontière nationale n'est plus la frontière de l'entreprise.

15. TOUTE USINE ÉTRANGÈRE N'EST PAS UNE DÉLOCALISATION

Le mot « délocalisation » semble offrir une explication immédiate. Une usine apparaît au Maroc ou en Roumanie ; on suppose qu'elle remplace une usine française. Parfois c'est vrai. Parfois l'implantation sert d'abord un marché local ou régional nouveau. Parfois elle produit un modèle auparavant fabriqué ailleurs. Parfois elle exporte ensuite vers la France. L'Insee montre qu'en 2023, parmi les sociétés de la filière disposant d'implantations à l'étranger, la proximité des sites clients est le

motif le plus cité, à 65 %, devant l'accès au marché, à 40 %, et la réduction du coût de main-d'œuvre, à 37 %.[11]

Ces motifs peuvent évidemment se cumuler. Mais ils suffisent à montrer que le coût salarial n'est pas l'unique logique. Pour parler rigoureusement de délocalisation, il faut documenter qu'une activité auparavant réalisée ici a réellement été déplacée, et non simplement constater qu'un groupe possède une usine ailleurs.

16. L'AUTOMOBILE FRANÇAISE EST UNE FILIÈRE, PAS SEULEMENT DEUX CONSTRUCTEURS

Fin 2023, l'Insee identifie environ 4 080 sociétés appartenant à la filière automobile française et 329 000 salariés dont le travail est consacré à cette filière.[11] Un quart environ de ces salariés travaille dans la construction automobile proprement dite. Le reste se répartit entre équipements, biens intermédiaires, machines, ingénierie, services industriels et autres maillons. Cette structure change notre manière de penser une fermeture ou une relocalisation.

Une usine terminale concentre l'attention parce qu'elle est visible. Mais les commandes qu'elle passe irriguent un ensemble beaucoup plus large d'entreprises. Une décision de modèle, de plateforme ou de volume peut donc affecter des travailleurs qui ne portent jamais le logo du constructeur.

17. ÉLECTRIFIER NE RECRÉE PAS AUTOMATIQUEMENT LES EMPLOIS DU THERMIQUE

La transition électrique ouvre une nouvelle phase de réorganisation. Elle crée de nouveaux besoins : cellules, modules, électronique de puissance, moteurs électriques, logiciels, systèmes thermiques, recharge et nouveaux procédés d'assemblage. Elle réduit ou transforme d'autres besoins liés au

moteur thermique, à l'échappement ou à certaines pièces mécaniques. En 2023, l'Insee indique que 70 % des sociétés contribuant à la fabrication de véhicules thermiques participent aussi à des véhicules électriques ou à hydrogène ; 40 % des sociétés de la filière déclarent avoir fait évoluer leur activité cette année-là pour concevoir ou produire des véhicules électriques.[11]

L'Insee montre en parallèle qu'une part significative des fournisseurs reste encore dépendante exclusivement du thermique.[10][15] Le problème n'est donc pas seulement le nombre total d'emplois créés et supprimés. Un emploi de fonderie disparu à un endroit n'est pas automatiquement remplacé, pour la même personne, par un emploi de batterie créé à plusieurs centaines de kilomètres et demandant une autre qualification. Le solde net masque la transition vécue.

18. LA COMPÉTENCE DEVIENT ELLE-MÊME UNE INFRASTRUCTURE

Une usine n'est pas seulement un bâtiment et des machines. Elle dépend de personnes capables de les faire fonctionner, de diagnostiquer les défauts et d'adapter le procédé. L'Insee montre que les entreprises de la filière confrontées à des difficultés de recrutement citent le manque de candidatures et l'inadéquation des compétences ; parmi elles, 80 % développent polyvalence et formation interne, et environ la moitié recourt à l'alternance ou à l'intérim.[11] Cette donnée corrige une vision purement salariale de la localisation industrielle.

Un territoire peut être plus cher mais conserver des compétences rares, des fournisseurs expérimentés, des centres d'ingénierie et une culture de production difficile à recréer rapidement. Inversement, un territoire qui perd longtemps ses ateliers peut perdre aussi la possibilité pratique de relocaliser

certaines productions. Le savoir-faire est donc un stock productif aussi réel qu'une presse ou une ligne d'assemblage, même s'il ne figure pas dans le même registre comptable.

19. QUI PEUT SUIVRE LE RÉGIME DE TRAVAIL SUIVANT ?

L'histoire que nous venons de parcourir n'est pas une succession propre de modèles qui se remplaceraient l'un après l'autre. Ils s'empilent. L'automobile a d'abord décomposé le travail pour produire en masse. Elle a recruté là où la main-d'œuvre était disponible. Elle a automatisé certaines tâches. Elle en a externalisé d'autres vers des fournisseurs. Elle a internationalisé ses chaînes de production.

Elle a élevé la qualification requise pour certains postes et supprimé ou fragilisé d'autres trajectoires. Elle reconstruit aujourd'hui une partie de la filière autour de l'électrique. Mais une usine contemporaine peut simultanément être robotisée, recourir à l'intérim, sous-traiter en France, importer des composants, dépendre d'un fournisseur étranger et former des techniciens hautement qualifiés. Le vrai objet n'est donc pas le remplacement d'un régime par un autre.

C'est la redistribution permanente du travail entre métiers, entreprises, territoires et pays. À chaque étape, un gain industriel réel peut exister : davantage de productivité, de qualité, de flexibilité, une baisse des coûts, une amélioration des conditions sur certains postes. Mais la question de ce livre revient. Qui définit l'optimum, et qui supporte le coût du changement ?

Le travailleur recruté pour une chaîne des années 1970, le fournisseur devenu dépendant d'un constructeur ou l'opérateur thermique de 2026 n'ont pas nécessairement les compétences, l'âge, le capital ou la mobilité géographique permettant de

devenir spontanément les bénéficiaires du régime suivant. Une transition industrielle n'est réellement intégrée que si elle regarde aussi le passage entre les régimes, pas seulement la performance de celui qui arrive.

20. LE TRAVAIL EST UNE PARTIE DU SYSTÈME AUTOMOBILE

L'automobile n'a jamais simplement « créé des emplois ». Elle a organisé des formes de travail. Elle a donné une valeur industrielle à certaines compétences, rendu d'autres gestes remplaçables, attiré des populations vers certains bassins, puis déplacé une partie de la production vers d'autres lieux. Elle a parfois offert ascension, formation et stabilité. Elle a aussi produit pénibilité, segmentation et dépendance.

Aucun de ces résultats n'épuise le système. Ils montrent simplement qu'une voiture moins chère ou une usine plus productive peuvent avoir des conséquences qui ne figurent pas dans le prix du véhicule. Le chapitre suivant regardera une nouvelle transformation : l'électrification. Nous n'y demanderons plus principalement qui travaille où, mais ce que cette transition résout techniquement, ce qu'elle déplace vers les batteries, le réseau et les chaînes industrielles mondiales, et ce qu'elle laisse intact dans le système automobile.

NOTES ET SOURCES

[1] [Légifrance, ordonnance n°45-2658 du 2 novembre 1945 portant création de l'Office national d'immigration.](#)

[2] [Assemblée nationale, mission d'information sur les immigrés âgés, auditions et rapport, 2013. Le document traite notamment du recrutement Renault/Citroën et des carrières d'ouvriers algériens.](#)

[3] [Musée national de l'histoire de l'immigration, Renault-Billancourt en mai 1968 : près de 21 000 ouvriers, environ un tiers d'étrangers.](#)

[4] [Laure Pitti, « Figure ouvrière et engagement dans la lutte de libération nationale. Les ouvriers algériens de Renault-Billancourt pendant la guerre d'Algérie », L'Homme et la société, 1995.](#)

- [5] [« Une expérience de grande portée dans le mouvement ouvrier », Persée, 1976. Données sur la structure de l'emploi immigré à Billancourt au milieu des années 1970.](#)
- [6] [Musée national de l'histoire de l'immigration, exposition consacrée à 1973 : grèves de travailleurs immigrés et conflit Renault-Billancourt.](#)
- [7] [Rapports publics et ressources Vie-publique sur l'immigration de travail : suspension de l'introduction de nouveaux travailleurs permanents en 1974.](#)
- [8] [Odile Merckling, « Transformation des emplois et substitution travailleurs français-travailleurs immigrés : le cas automobile », Sociologie du travail, 1986.](#)
- [9] [Benjamin Coriat, « La robotique à la Régie Renault », Revue d'économie industrielle, 1983.](#)
- [10] [Insee, La filière automobile entre 2010 et 2023 : Anatomie d'une chute, document de travail 2026-04.](#)
- [11] [Insee, Le poids de la filière automobile française : 329 000 salariés et 1,1 % du PIB, Insee Première n°2083, 2025.](#)
- [12] [Insee, L'automobile en France : l'internationalisation de la production des groupes pèse sur la balance commerciale, Insee Première n°1783, 2019.](#)
- [13] [Insee, note de conjoncture sur la localisation géographique de la production automobile des constructeurs français et allemands, données 2000-2017.](#)
- [14] [Légifrance, ordonnance n°45-68 du 16 janvier 1945 portant nationalisation des usines Renault.](#)
- [15] [Insee, La filière automobile manufacturière en France entre 2010 et 2023 : entre recul et adaptation, 2026.](#)
- [16] [Sénat, rapport 2026 sur le soutien de l'État à la filière automobile : internationalisation, emploi et territoires.](#)

CHAPITRE 9 — ÉLECTRIFIER LA VOITURE OU TRANSFORMER LE SYSTÈME ?

OUVERTURE — UNE VOITURE QUI BRANCHE DEUX SYSTÈMES

Une voiture thermique transporte son énergie dans un réservoir. Une voiture électrique transporte aussi son énergie, mais sa batterie doit régulièrement se reconnecter à un système qui produit, transporte et distribue de l'électricité. Ce changement paraît simple lorsqu'on regarde seulement le véhicule. On remplace un moteur thermique par un moteur électrique. On retire le réservoir, l'échappement et une partie de la mécanique.

On ajoute une batterie, de l'électronique de puissance et une prise. Mais à l'échelle du système, l'opération est beaucoup plus profonde. L'automobile se branche désormais directement sur le réseau électrique. Elle dépend d'une chaîne mondiale de cellules, de matériaux actifs, de logiciels et de procédés électrochimiques. Elle peut devenir une consommation flexible et, dans certains cas, restituer de l'énergie au réseau.

Elle déplace une partie des dépendances du pétrole vers les minerais, les matériaux transformés, les cellules et le savoir-faire industriel. En même temps, elle reste une voiture. Elle occupe une place sur la route et au stationnement. Elle peut peser deux tonnes, user des pneus, rester bloquée dans un embouteillage et être indispensable dans un territoire organisé autour de longues distances.

La bonne question n'est donc ni « l'électrique résout-il tout ? » ni « ne fait-il que déplacer la pollution ? » Il faut séparer les fonctions. Qu'est-ce que l'électrification résout réellement ?

Qu'est-ce qu'elle déplace ? Et qu'est-ce qui ne change presque pas lorsque seul le groupe motopropulseur change ?

1. CE QUE LE MOTEUR ÉLECTRIQUE RÉSOUT RÉELLEMENT

Le premier gain est difficile à contester : la conversion électrique est beaucoup plus efficace. La Commission européenne indique qu'à l'échelle tank-to-wheels l'efficacité d'un véhicule électrique est environ trois fois supérieure à celle d'un véhicule à moteur thermique.[1] Une batterie alimente un moteur électrique avec relativement peu d'étapes de conversion. Dans un moteur thermique, une grande partie de l'énergie du carburant finit en chaleur plutôt qu'en mouvement utile.

Le véhicule électrique à batterie supprime aussi les émissions d'échappement de CO₂, NO_x, hydrocarbures non méthaniques et particules au point d'usage.[1] Dans une rue dense, cela change réellement l'exposition locale. Mais « pas d'échappement » n'est pas « pas d'impact ». L'électricité doit être produite. La batterie doit être fabriquée. Le véhicule use toujours des pneus et de la chaussée. Le bon énoncé est donc plus précis : le VE résout une part importante des pertes de conversion et supprime les émissions d'échappement locales, sans supprimer tous les flux physiques liés à l'automobile.

2. LE CYCLE DE VIE NE SE RÉDUIT PAS À L'ÉCHAPPEMENT

Comparer seulement l'énergie consommée sur la route avantage logiquement l'électrique. Comparer seulement la fabrication de la batterie peut produire l'impression inverse. Aucune de ces deux comparaisons n'est suffisante. Il faut compter fabrication du véhicule, fabrication de la batterie, production de l'énergie, usage et fin de vie. La Commission européenne cite une étude de 2020 selon laquelle, dans les

conditions moyennes de l'Union européenne étudiées, l'impact climatique sur cycle de vie d'un véhicule électrique à batterie de gamme inférieure ou moyenne représentait environ 45 % de celui d'une voiture à essence et 53 % de celui d'un diesel comparable.[2]

Ce résultat ne doit pas devenir une constante. Le mix électrique d'un pays, la taille de la batterie, le kilométrage et la durée de vie comptent, tandis que les procédés industriels évoluent. Le résultat utile est donc moins un pourcentage unique qu'une méthode : lorsqu'on compare des motorisations, on compare des fonctions et des cycles de vie comparables.

3. TROIS PROBLÈMES DIFFÉRENTS : ÉNERGIE ANNUELLE, PUISSANCE ET RÉSEAU LOCAL

L'électrification du parc pose immédiatement une question : la France pourra-t-elle produire assez d'électricité ? RTE estime actuellement que la recharge des véhicules électriques pourrait représenter environ 12 à 15 % de la consommation totale d'électricité française en 2035.[3] Une étude Enedis publiée en 2024, fondée sur un scénario d'environ 18 millions de véhicules électriques et hybrides rechargeables, donnait environ 40 TWh, soit 6 % des 615 TWh du scénario de consommation totale qu'elle utilisait.[4] Les deux chiffres ne sont pas directement comparables. Ils reposent sur des scénarios et des périmètres différents.

Ils montrent toutefois la même chose : électrifier les voitures ne signifie pas mécaniquement doubler la consommation nationale d'électricité. Mais l'énergie annuelle n'est qu'une dimension. Un réseau doit aussi fournir la puissance demandée à chaque instant. Et un poste de distribution peut être saturé localement même si la France dispose, sur l'année, de

suffisamment d'énergie. Un TWh, un GW de pointe et une capacité de câble ne répondent pas à la même question.

4. AVANT LE V2G, LA RECHARGE EST DÉJÀ FLEXIBLE

Une station-service doit fournir le carburant lorsque le conducteur s'arrête. Une voiture électrique branchée plusieurs heures n'a pas forcément besoin de charger immédiatement à pleine puissance. Si le conducteur rentre à 18 heures et repart à 7 heures avec un besoin de 20 kWh, le système dispose d'une fenêtre. Enedis appelle pilotage de la recharge l'adaptation de l'heure de démarrage ou de la puissance, tout en garantissant le niveau demandé lorsque le véhicule doit repartir.[4]

Dans son scénario 2035, Enedis estime que la généralisation du pilotage peut réduire d'environ 10 GW la pointe par rapport à une recharge non pilotée.[4] Ce n'est pas une économie de 10 GW d'énergie. Le véhicule consommera toujours les kWh nécessaires. Le gain vient du moment où ils sont appelés. Le VE devient alors une charge flexible. Cette flexibilité existe avant même de demander à la batterie de renvoyer de l'électricité vers le réseau.

5. POURQUOI « CHARGER LA NUIT » N'EST PLUS UNE RÈGLE UNIVERSELLE

Pendant longtemps, les heures creuses ont surtout évoqué la nuit. Cette règle avait un sens dans un système où la demande nocturne était plus faible et où une grande partie de la production était peu flexible. Le système change. Depuis le 1er novembre 2025, Enedis déploie une nouvelle répartition des heures creuses : au moins cinq heures consécutives restent comprises entre 23 h et 7 h, mais les trois heures restantes peuvent être déplacées entre 11 h et 17 h selon les conditions locales.[5]

RTE souligne de son côté qu'une recharge peut être décalée lorsque l'électricité est abondante, notamment en début d'après-midi lors de forte production solaire.[3] Cela ne signifie pas que la nuit devient mauvaise. Cela signifie qu'une heure fixe n'est plus l'optimum universel. Le véhicule peut être branché lorsqu'il arrive et laisser le système choisir le moment de charge compatible avec le besoin du conducteur.

6. LE V2G EXISTE, SANS RENDRE TOUTE BATTERIE DISPONIBLE AU RÉSEAU

Le vehicle-to-grid ajoute une étape. La voiture ne fait plus seulement varier sa consommation. Elle peut restituer de l'électricité. RTE a déjà certifié en France la participation de batteries de flottes de véhicules électriques au réglage primaire de fréquence : leur charge et leur décharge peuvent être modulées en quelques secondes pour contribuer à l'équilibre du système.[7]

Il s'agit d'une preuve de fonctionnement réel, pas seulement d'un concept de laboratoire. RTE estime aussi que, dans un scénario 2050, 2 % du parc de véhicules électriques participant au V2G pourraient fournir une puissance de l'ordre de 1,7 GW. [6] Ce chiffre ne décrit pas une capacité installée aujourd'hui. Il montre que même une fraction du parc peut devenir un actif électrique significatif lorsque les conditions techniques et contractuelles sont réunies.

7. LA BATTERIE TOTALE DU PARC N'EST PAS UN RÉSERVOIR COLLECTIF LIBREMENT MOBILISABLE

Il est tentant de multiplier des millions de voitures par plusieurs dizaines de kWh et d'annoncer un stockage gigantesque. Le calcul est arithmétiquement correct et fonctionnellement trompeur. Une voiture peut être en

circulation. Elle peut ne pas être branchée. Sa batterie peut être trop vide pour restituer de l'énergie ou trop pleine pour absorber davantage.

Le conducteur peut demander un niveau minimal pour un départ imminent. Le chargeur peut limiter la puissance. Le réseau local peut lui-même imposer une contrainte. La garantie ou la stratégie de vieillissement peut limiter les cycles. Le stockage réellement disponible est donc une fraction variable du stockage nominal. Un système électrique peut exploiter une partie de cette flexibilité. Il ne devient pas propriétaire de l'énergie de mobilité des conducteurs.

8. QUELLE AUTONOMIE FAUT-IL RÉELLEMENT ACHETER ?

L'autonomie rassure. Elle permet les longs trajets, absorbe les incertitudes de température et réduit la fréquence des arrêts. Mais elle a un coût physique. L'IEA indique qu'en 2025 la capacité moyenne des voitures électriques à batterie est proche de 70 kWh dans l'Union européenne, inférieure à 60 kWh en Chine et autour de 90 kWh aux États-Unis.[8]

La différence n'est pas anodine. Une batterie plus grande demande davantage de cellules, de matériaux et de masse. Elle augmente souvent le coût de fabrication. Elle peut également augmenter l'énergie nécessaire pour déplacer le véhicule. Cela ne signifie pas qu'une grande batterie est irrationnelle. Certains usages en ont réellement besoin. Mais le dimensionnement de la batterie devient une question de service : combien d'autonomie faut-il pour l'usage réel, compte tenu de la vitesse de recharge et de la disponibilité du réseau ?

9. LFP, NMC, SODIUM-ION : LA CHIMIE CHANGE LE BESOIN MATIÈRE

Parler de « la batterie » comme d'un objet unique masque une transformation rapide. En 2025, les batteries LFP représentent plus de 55 % des batteries de véhicules électriques déployées mondialement selon l'IEA.[8] Leur cathode n'utilise ni nickel ni cobalt. Elles sont généralement moins coûteuses, avec une densité énergétique plus faible que les chimies NMC les plus performantes.

Le sodium-ion entre à son tour dans une phase de montée en échelle.[8] Il peut réduire l'exposition au lithium, mais sa densité énergétique reste inférieure et sa chaîne industrielle demeure beaucoup plus petite, avec plusieurs étapes encore concentrées en Chine. Une transition de chimie ne supprime donc pas le besoin de matière. Elle modifie quels matériaux deviennent critiques, combien il en faut et où se trouve le savoir-faire industriel.

10. INTÉGRER DAVANTAGE LE PACK PEUT COMPLIQUER LE DÉMONTAGE

Une batterie est aussi une architecture. Les conceptions cell-to-pack et cell-to-chassis retirent des structures intermédiaires pour utiliser plus efficacement le volume et la masse. Cette intégration peut améliorer le rapport énergie/masse et réduire certaines pièces. Mais l'IEA note qu'elle ajoute des complications au recyclage.[8] Le même arbitrage peut apparaître lors d'une réparation. Plus les éléments sont fortement intégrés à la structure du véhicule, plus le remplacement d'un sous-ensemble peut devenir complexe.

L'optimum de fabrication n'est donc pas automatiquement l'optimum de maintenance ou de fin de vie. Nous retrouvons ici une question déjà vue au chapitre 2 : intégrer davantage peut

améliorer le produit neuf tout en augmentant le coût de séparation ultérieure.

La longévité de la batterie doit cependant être distinguée de la réparabilité du véhicule. Les données de terrain ne montrent pas une frontière générale à dix ans. Geotab a analysé plus de 22 700 véhicules électriques de 21 modèles et observe, dans son jeu de données, une dégradation moyenne de capacité d'environ 2,3 % par an.[15] Cette moyenne ne doit pas être extrapolée comme une loi linéaire valable pour toute batterie, mais elle suffit à écarter l'idée d'une extinction mécanique uniforme au dixième anniversaire.

La chaleur compte réellement. Dans les données Geotab, les véhicules exploités dans les climats chauds se dégradent en moyenne d'environ 0,4 point de pourcentage supplémentaire par an par rapport aux climats tempérés.[15] La recharge rapide à forte puissance apparaît également comme un facteur important : le groupe fortement exposé aux charges DC supérieures à 100 kW atteint environ 3,0 % de dégradation annuelle contre 1,5 % dans le groupe le moins exposé.[15] Une canicule n'« tue » donc pas nécessairement une batterie, mais la température, la puissance de charge, la chimie et la gestion thermique modifient effectivement sa trajectoire de vieillissement.

Il faut aussi séparer vieillissement de capacité et panne. Consumer Reports, à partir de réponses portant sur environ 380 000 véhicules, trouve pour les millésimes 2023 à 2025 davantage de problèmes signalés sur les électriques et hybrides rechargeables que sur les voitures à essence, en partie parce que beaucoup de ces modèles reposent sur des plateformes et des systèmes encore récents.[16] Certains défauts concernent précisément des fonctions qui n'existent pas dans un thermique classique : chargeur embarqué, électronique de puissance, gestion haute tension ou contrôle de charge. Cela confirme qu'un véhicule électrique peut demander peu d'entretien courant tout en connaissant des défaillances coûteuses qui ne relèvent pas de l'usure ordinaire.

Mais une autre mesure donne un résultat différent. Dans sa statistique de pannes 2026, l'ADAC observe qu'à quatre ans les véhicules électriques étudiés connaissent environ 6,5 pannes immobilisantes pour 1 000 véhicules contre 12,5 pour les thermiques du même âge.[17] La batterie 12 V reste la cause la plus fréquente pour les deux motorisations, tandis que l'électronique de bord ressort davantage comme point faible des électriques.[17] Les deux résultats ne se contredisent pas : une enquête de propriétaires compte de nombreux défauts qui n'immobilisent pas nécessairement le véhicule, alors qu'une statistique d'assistance routière mesure les pannes qui empêchent de continuer le trajet.

Enfin, les remplacements complets de batterie restent rares dans les données disponibles, mais l'âge des cohortes impose de la prudence. Recurrent rapporte, hors grands rappels, moins de 4 % de remplacements dans une population de plus de 30 000 véhicules, avec un taux nettement plus élevé sur les premières générations devenues aujourd'hui les plus âgées. [18] Cela ne prouve pas que tous les VE récents dureront vingt ans ; cela montre seulement que « batterie remplacée avant dix ans » n'est pas aujourd'hui la trajectoire dominante observée dans cet échantillon.

La vraie question de durabilité n'est donc pas de savoir si « l'électrique dure dix ans ». Elle est de savoir si une perte de capacité, une panne d'électronique de puissance, un défaut de gestion thermique ou un sous-ensemble de batterie peuvent être diagnostiqués et réparés à un coût compatible avec la valeur résiduelle du véhicule. C'est ici que la batterie redevient un test d'architecture : un pack chimiquement encore viable peut participer à la mort économique d'une voiture si la seule procédure disponible consiste à remplacer un ensemble trop coûteux.

Un autre sujet exige la même prudence : l'incendie. Le 12 septembre 2026, le BEA-TT a ouvert une enquête sur l'incendie d'un véhicule léger à propulsion électrique dans une tranchée couverte de l'A13 à Mantes-la-Ville.[19] Au moment où ce texte est rédigé, l'enquête est toujours en cours et sa fiche technique détaillée n'est pas encore publiée. Il serait donc prématuré d'attribuer publiquement la cause à la batterie, à un défaut précis du véhicule ou à un mécanisme de verrouillage des portes.

Ce cas rappelle surtout une règle d'analyse. La gravité potentielle d'un événement et sa fréquence sont deux questions différentes. Un incendie de batterie peut poser des problèmes particuliers de propagation thermique, de dégagements et d'intervention, ce qui justifie des procédures spécifiques et une enquête technique lorsqu'un accident grave survient. Mais un cas spectaculaire, même dramatique, ne suffit pas à mesurer la probabilité générale d'incendie d'une motorisation. Pour cela, il faut un dénominateur : nombre de véhicules, âge du parc, kilométrage, circonstances et cause réelle des sinistres.

11. POURQUOI LE RECYCLAGE ARRIVE TROP TARD POUR SUPPRIMER L'EXTRACTION À COURT TERME

Le recyclage est souvent présenté comme la réponse naturelle aux matières critiques. Il est indispensable. Il ne peut pourtant pas alimenter entièrement une industrie dont le parc croît rapidement. L'IEA estime que les rebuts de production resteront la principale alimentation du recyclage des batteries jusqu'à ce que les batteries réellement en fin de vie prennent le relais vers le milieu des années 2030.[8]

Le paradoxe est simple. Une batterie durable est souhaitable. Mais plus elle reste longtemps dans un véhicule ou en usage, plus ses matériaux reviennent tard dans la boucle. Lorsqu'un parc augmente, il faut simultanément produire de nombreuses batteries nouvelles et attendre que les anciennes atteignent leur fin de vie. La circularité réduit donc progressivement le besoin de matière primaire. Elle ne le supprime pas instantanément.

12. LE PASSEPORT BATTERIE ET LES OBLIGATIONS EUROPÉENNES DE CIRCULARITÉ

Le règlement européen 2023/1542 transforme progressivement la batterie en objet plus traçable. À partir du 18 février 2027, chaque batterie de véhicule électrique mise sur le marché ou en service doit être associée à un passeport électronique.[11] Le règlement impose aussi des objectifs distincts. Pour les batteries au lithium, le rendement de recyclage doit atteindre au moins 65 % en masse fin 2025 puis 70 % fin 2030.

La récupération matière doit atteindre fin 2027 au moins 90 % pour cobalt, cuivre, plomb et nickel, et 50 % pour lithium ; les objectifs montent en 2031 à 95 % pour les quatre premiers et 80 % pour le lithium.[11] À partir d'août 2031, les batteries de VE concernées doivent également démontrer des parts minimales de matériaux recyclés dans les matières actives : 16 % de cobalt, 6 % de lithium, 6 % de nickel et 85 % de plomb, avec des seuils renforcés en 2036.[11] En septembre 2026, la Commission a conclu que les objectifs européens de recyclage et de récupération matière restaient adaptés à ce stade.[12] Un taux de recyclage ne signifie pourtant pas une boucle fermée parfaite. Il indique la performance minimale d'une étape du système.

13. SECONDE VIE, MAINTIEN DANS LE VÉHICULE OU RECYCLAGE ?

Une batterie qui ne convient plus à une automobile peut encore stocker de l'électricité. Cette idée rend la seconde vie stationnaire séduisante. Mais elle suppose de connaître l'état de santé, de garantir la sécurité, de démonter et reconfigurer le pack, d'assurer sa traçabilité et de trouver un modèle économique face à des batteries neuves dont le prix baisse.

L'IEA souligne ces contraintes et rappelle que le réemploi ou la remise à niveau dans l'automobile peuvent parfois conserver davantage de valeur avant le recyclage.[8] Il n'existe donc pas une hiérarchie automatique valable pour chaque pack. Maintenir, réparer, remanufacturer, réemployer en stationnaire ou recycler sont des options à comparer selon l'état réel de la batterie et le service demandé.

14. DU PÉTROLE AUX CELLULES : DÉPLACEMENT DES DÉPENDANCES

Une voiture thermique dépend d'un flux continu de carburant pendant son usage. Une voiture électrique déplace une partie de cette dépendance vers la fabrication initiale de la batterie et vers l'électricité consommée ensuite. La géographie industrielle change. Selon l'IEA, la Chine représentait en 2025 environ 70 % de la production mondiale de voitures électriques, plus de 80 % de la production de cellules, environ 85 % des matériaux actifs de cathode et plus de 90 % des matériaux actifs d'anode utilisés dans les batteries de voitures électriques.[9]

Ces chiffres ne signifient pas que tous les minerais sont extraits en Chine. Ils décrivent une concentration dans plusieurs étapes industrielles de transformation et de fabrication. Le risque stratégique ne disparaît donc pas avec le pétrole. Il change de forme.

15. UNE GIGAFACTORY N'EST PAS TOUTE UNE CHAÎNE INDUSTRIELLE

L'Europe construit des capacités de production de cellules. Cela ne suffit pas à conclure qu'elle maîtrise la chaîne. À fin 2025, l'IEA estime que la Chine détient plus de 80 % de la capacité mondiale nominale de fabrication de batteries lithium-ion, contre environ 6 à 7 % pour l'Union européenne et une part

comparable pour les États-Unis.[8] Surtout, l'IEA rappelle qu'une nouvelle usine peut mettre plus de cinq ans après son démarrage à approcher son niveau de production nominal.

Une capacité installée n'est donc pas immédiatement une production compétitive. Et une usine de cellules peut toujours dépendre d'importations de matériaux actifs, de précurseurs, de graphite, de machines ou de savoir-faire. Une politique industrielle qui ne regarde que le nombre de GWh annoncés peut confondre bâtiment, capacité, production et autonomie.

16. CHINE ET EUROPE : CONCURRENCE, POLITIQUE INDUSTRIELLE ET CONTESTATION COMMERCIALE

La concentration de la chaîne électrique a aussi un effet politique. Le 29 octobre 2024, à l'issue de son enquête antisubventions, la Commission européenne a institué pour cinq ans des droits compensateurs définitifs sur les véhicules électriques à batterie produits en Chine.[13] La Commission a conclu que la chaîne de valeur chinoise bénéficiait de subventions qu'elle jugeait déloyales et menaçant de causer un préjudice économique aux producteurs européens. La Chine conteste ces conclusions et ces mesures.

Elle a porté le différend devant l'Organisation mondiale du commerce. Un groupe spécial a été établi le 25 avril 2025 ; en avril 2026, son président indiquait ne pas attendre de rapport final avant le deuxième trimestre 2027.[14] Le fait établi est donc double : l'Union européenne applique des droits fondés sur son enquête, et cette qualification est contestée dans une procédure internationale encore non tranchée. Une politique commerciale peut protéger une capacité locale ou modifier les incitations d'investissement. Elle peut aussi augmenter certains prix ou réduire certaines sources de concurrence. Le chapitre n'a pas besoin de choisir une morale commerciale pour

constater que l'électrification est devenue une question de stratégie industrielle.

17. CE QUE L'ÉLECTRIQUE CHANGE DANS LA VALEUR INDUSTRIELLE

Le groupe motopropulseur électrique contient moins de mécanique thermique traditionnelle. En contrepartie, batterie, électronique de puissance, semi-conducteurs, logiciel et gestion thermique deviennent plus importants. La valeur industrielle se déplace. Le chapitre 8 a montré ce que ce déplacement fait aux emplois et aux compétences. Ici, l'enjeu est la structure de dépendance. Une entreprise très forte en moteurs thermiques peut perdre une partie de son avantage. Une entreprise forte en cellules, électronique ou logiciel peut en gagner. Le changement de motorisation devient ainsi une reconfiguration de la hiérarchie industrielle, même si le client continue à voir quatre roues, cinq places et un volant.

18. UNE GRANDE VOITURE ÉLECTRIQUE RESTE UNE GRANDE VOITURE

Électrifier ne supprime pas la variable de taille. En 2025, les grandes voitures et SUV représentent près de 70 % du marché mondial des voitures électriques selon l'IEA.[10] En Europe, près des trois quarts des modèles électriques comme conventionnels disponibles appartiennent aux grandes catégories ou SUV.[10] Un grand SUV électrique peut être beaucoup plus efficace énergétiquement qu'un SUV thermique comparable. Il peut également présenter un meilleur bilan climatique sur cycle de vie. Mais il demande davantage de carrosserie, de pneus et souvent de batterie qu'un petit VE. Deux questions doivent donc rester séparées : quelle motorisation convertit le mieux l'énergie

? et quelle quantité de véhicule faut-il pour rendre le service demandé ?

19. CE QUE L'ÉLECTRIFICATION LAISSE INTACT

Remplacer un moteur thermique par un moteur électrique change beaucoup de choses. Cela ne change pas la largeur de la rue. Cela ne crée pas une place de stationnement supplémentaire. Cela ne supprime pas l'embouteillage. Cela ne supprime pas une collision. Cela ne rapproche pas un emploi situé à trente kilomètres. Cela ne retire pas l'usure des pneus.

La régénération réduit l'usage des freins, mais les particules de pneus et de chaussée restent. La masse et la puissance restent pertinentes pour les matériaux et les interactions en collision. La dépendance territoriale décrite au chapitre 7 peut donc subsister presque entièrement dans un parc électrifié. Électrifier l'énergie et transformer l'accessibilité sont deux opérations différentes.

20. ÉLECTRIFIER LA VOITURE : JUSQU'OU TRANSFORMER LA MOBILITÉ ?

Nous pouvons maintenant répondre à la question du chapitre. L'électrification n'est pas un simple changement de moteur. Elle améliore fortement la conversion énergétique. Elle supprime les émissions d'échappement locales. Elle branche le parc sur le système électrique. Elle peut rendre la recharge flexible et, dans certains cas, fournir du stockage au réseau. Elle recompose les matières, les usines, les compétences et la géopolitique industrielle.

En ce sens, elle transforme réellement le système automobile. Mais elle ne transforme pas automatiquement toutes ses dimensions. Si les mêmes ménages possèdent les mêmes gabarits de véhicules, parcourent les mêmes distances, occupent

les mêmes routes et stationnements et dépendent des mêmes localisations, une grande partie du système de mobilité reste intacte. Le VE peut donc être simultanément une amélioration majeure et une transformation incomplète.

C'est précisément ce qui rend la dernière question du livre nécessaire. Après avoir séparé motorisation, matière, territoire, travail et industrie, le chapitre 10 pourra demander non pas quelle voiture est parfaite, mais quelle combinaison de taille, durée, réparabilité, batterie, modèle économique et organisation de la mobilité fournirait réellement le service avec le moins de coûts déplacés.

NOTES ET SOURCES

[1] [Commission européenne, Electric vehicles — rendement tank-to-wheels et émissions au point d'usage.](#)

[2] [Commission européenne, Climate Action, « 5 things you should know about electric cars », 2024 ; référence à une étude de cycle de vie 2020.](#)

[3] [RTE, « Électrification des transports : défis et opportunités » — consommation 2035, flexibilité, smart charging et V2G.](#)

[4] [Enedis, « 18 millions de voitures électriques pilotées en 2035 », 2024 — énergie, pointe et pilotage.](#)

[5] [Enedis, « Modification des heures creuses », réforme déployée depuis le 1er novembre 2025.](#)

[6] [RTE, « Neutralité carbone : devra-t-on remplacer chaque voiture thermique par un modèle électrique ? » — potentiel V2G à horizon 2050.](#)

[7] [RTE, « Première en France : des véhicules électriques pourront participer à l'équilibrage en temps-réel du système électrique » — certification de flottes V2G.](#)

[8] [IEA, Global EV Outlook 2026, « Electric vehicle batteries » — tailles, chimies, architecture, recyclage, seconde vie et capacités industrielles.](#)

[9] [IEA, Global EV Outlook 2026, « Manufacturing and trade » — géographie de la production, cellules, cathodes et anodes.](#)

[10] [IEA, Global EV Outlook 2026, « Trends in electric cars » — segments, SUV et offre de modèles.](#)

[11] [Règlement \(UE\) 2023/1542 relatif aux batteries et déchets de batteries — passeport, recyclage, récupération matière et contenu recyclé.](#)

[12] Commission européenne, « Waste batteries: recycling targets remain fit for purpose », 11 septembre 2026.

[13] Commission européenne, 29 octobre 2024, institution de droits compensateurs définitifs sur les BEV produits en Chine.

[14] OMC, différend DS630, European Union — Definitive Countervailing Duties on New Battery Electric Vehicles from China.

[15] Geotab, « How long do electric car batteries last? The updated guide to real-world EV battery health », analyse publiée en 2026 sur plus de 22 700 VE et 21 modèles — dégradation moyenne, effet des climats chauds et de la recharge rapide.

[16] Consumer Reports, « Hybrids Are Still the Most Reliable Cars, CR Survey Shows », mise à jour du 4 décembre 2025 — enquête de fiabilité fondée sur environ 380 000 véhicules ; comparaison des problèmes signalés selon les motorisations.

[17] ADAC, Pannenstatistik 2026, 23 avril 2026 — pannes immobilisantes par âge et motorisation ; rôle de la batterie 12 V et de l'électronique de bord.

[18] Recurrent, « New Data: How Long Do Electric Car Batteries Last? », 11 novembre 2025 — population de plus de 30 000 VE, remplacements de batteries hors rappels majeurs et différences entre générations.

[19] BEA-TT, « Les enquêtes en cours », incendie d'un véhicule léger à propulsion électrique dans une tranchée couverte de l'A13 à Mantes-la-Ville, accident du 12 septembre 2026, enquête ouverte le 16 septembre 2026.

CHAPITRE 10 — QUE SERAIT UNE AUTOMOBILE SOBRE ?

OUVERTURE — UNE VOITURE N'EST SOBRE QUE PAR RAPPORT À CE QU'ON LUI DEMANDE

Une voiture de 800 kilogrammes peut être surdimensionnée pour un trajet de deux kilomètres. Une voiture de 1 700 kilogrammes peut être proportionnée à un usage professionnel qui transporte plusieurs personnes et du matériel sur de longues distances. La sobriété n'est donc pas une forme. Ce n'est pas non plus un style visuel, une nostalgie mécanique ou une préférence pour les petits objets.

Elle n'a de sens qu'en relation avec le service réellement rendu. Après neuf chapitres, nous pouvons enfin poser la question autrement. Il ne s'agit plus de demander quelle technologie est la meilleure prise isolément. Il s'agit de savoir quelle combinaison de masse, durée, batterie, réparabilité, sécurité, modèle économique et organisation de l'usage réduit réellement les coûts déplacés sans rendre le service impossible.

Une automobile sobre ne serait donc pas « la voiture minimale ». Elle serait une voiture proportionnée à sa fonction, assez durable pour amortir ce qui a été produit, assez maintenable pour ne pas devenir économiquement morte au premier défaut coûteux, assez sûre pour ses occupants et pour les autres, et assez compatible avec son territoire pour ne pas créer davantage de dépendance qu'elle n'en résout. Le problème est que ces objectifs ne s'alignent pas spontanément.

Plus de modularité peut ajouter des interfaces. Plus de masse peut protéger l'occupant dans certains chocs tout en aggravant

le conflit avec un véhicule plus léger. Une batterie plus grande peut sécuriser un usage réel tout en augmentant matière et poids. Une longue durée peut être souhaitable, mais pas si elle fige une architecture devenue dangereuse ou impossible à maintenir. Le dernier chapitre du livre doit donc être un test de cohérence, pas une proclamation.

1. COMMENCER PAR LE SERVICE

La première erreur serait de dessiner la voiture avant de définir ce qu'elle doit faire. Combien de personnes transporte-t-elle habituellement ? Quelle distance parcourt-elle ? À quelle fréquence doit-elle réaliser un trajet long ? Doit-elle remorquer, transporter du matériel ou accueillir une personne à mobilité réduite ? Dispose-t-elle d'une recharge régulière ? Existe-t-il un train, un bus, un vélo ou une solution de covoiturage pour une partie du trajet ?

Ces questions changent tout. Un véhicule urbain utilisé pour dix kilomètres quotidiens n'a pas besoin du même gabarit, de la même autonomie ni de la même robustesse qu'un véhicule rural ou professionnel. La sobriété commence donc par la proportion. Le véhicule doit être suffisant pour le service. Au-delà, chaque kilogramme, chaque kilowattheure de batterie et chaque centimètre supplémentaire doivent justifier une fonction réelle.

2. RÉDUIRE MASSE ET TAILLE, JUSQU'OU ?

La réduction de masse reste l'un des leviers les plus directs. Moins de structure peut signifier moins de matière. Des pneus plus petits utilisent moins de matière. Une voiture plus légère peut nécessiter une batterie plus petite pour une même autonomie utile. Elle demande aussi moins d'énergie pour chaque accélération. Mais le mot important est « peut ».

Une petite voiture peut être mal conçue. Une grande voiture peut répondre à une contrainte réelle. L'IEA montre qu'en 2025 les grandes voitures et SUV représentent près de 70 % du marché mondial des véhicules électriques, tandis que les petits modèles restent minoritaires dans l'offre.[8] Le problème n'est donc pas l'existence de grands véhicules. Il est leur généralisation comme norme, y compris lorsque l'usage ne l'exige pas. Une automobile sobre chercherait d'abord à réduire le surdimensionnement.

3. SÉCURITÉ : SORTIR DE LA COURSE INDIVIDUELLE À LA MASSE

La masse pose un conflit particulier. L'IIHS rappelle qu'à technologie comparable un véhicule plus lourd protège généralement mieux ses propres occupants lorsqu'il heurte un véhicule plus léger.[7] Du point de vue individuel, acheter plus lourd peut donc sembler rationnel. Mais si chacun répond de cette manière, le parc devient plus lourd. L'avantage individuel se transforme alors en risque collectif.

Les travaux de l'IIHS montrent aussi que la compatibilité géométrique entre structures a réduit une partie de l'agressivité historique des SUV envers les voitures, tandis que les pickups restent plus problématiques dans certains conflits.[7] Cela ouvre une autre voie. Au lieu de traiter la sécurité comme une simple accumulation de masse, il faut travailler compatibilité des structures, gestion de l'énergie de choc, visibilité, vitesse et composition générale du parc. Une automobile sobre ne serait donc pas nécessairement la plus légère possible. Elle chercherait à ne pas acheter sa sécurité en transférant inutilement le risque aux autres.

4. DIMENSIONNER LA BATTERIE AU BESOIN RÉEL

Le même raisonnement vaut pour l'autonomie. Une grande batterie rend le véhicule plus polyvalent. Elle réduit l'anxiété, facilite les longs trajets et protège contre certaines incertitudes. Mais elle mobilise davantage de cellules, de matière et de masse. L'IEA indique qu'en 2025 la batterie moyenne d'une voiture électrique est proche de 70 kWh dans l'Union européenne, sous 60 kWh en Chine et autour de 90 kWh aux États-Unis.[9]

Ces écarts montrent qu'il n'existe pas une taille « naturelle » de batterie. Le choix dépend d'un marché, d'un territoire et d'une infrastructure. Une automobile sobre chercherait donc à acheter l'autonomie nécessaire, pas l'autonomie maximale disponible. Dans un territoire bien équipé en recharge, une batterie plus petite peut rendre le même service. Dans un territoire où la recharge est rare ou pour un usage professionnel intensif, la même réduction peut devenir une fausse économie.

5. UNE VOITURE MODERNE PEUT DÉJÀ DURER LONGTEMPS

Le livre ne peut pas conclure en répétant que les voitures modernes seraient conçues pour casser rapidement. Les travaux de Greene et Leard sur le parc américain montrent au contraire une progression durable de la longévité des véhicules légers ; vers 2020, ils trouvent des durées médianes attendues d'environ 17 ans pour les voitures, 20 ans pour les SUV et vans, et 25 ans pour les pickups.[10] Ces chiffres ne décrivent pas la France et ne constituent pas une norme universelle. Ils suffisent toutefois à invalider l'idée simple d'une dégradation générale et uniforme de la durée de vie.

Le problème se déplace. Si un véhicule peut physiquement durer longtemps, qu'est-ce qui le fait sortir du parc : une corrosion grave, un accident, une réparation trop chère, une pièce indisponible, un calculateur non maintenu ou une batterie

déclarée économiquement irréparable ? La sobriété porte donc moins sur une durée théorique maximale que sur la capacité à conserver la valeur d'usage.

6. CONCEVOIR LES PIÈCES FAIBLES POUR QU'ELLES PUISSENT ÊTRE REMPLACÉES

Un véhicule durable n'est pas un véhicule dont chaque composant serait éternel. Une pompe, un roulement, une suspension, une batterie auxiliaire ou un élément électronique peuvent avoir une durée plus courte que la coque. La question est alors : le remplacement est-il prévu ? Les principes de maintenabilité utilisés par la NASA intègrent accès, unités remplaçables, documentation, pièces de rechange, supportabilité et coût de cycle de vie dès la conception.[1][2]

Une automobile n'est évidemment pas un système spatial. Le niveau de redondance, de documentation et de coût acceptable n'est pas le même. Mais le principe est transposable : si certaines pièces sont statistiquement plus susceptibles de tomber en panne, leur accès et leur remplacement doivent faire partie du design. La sobriété n'exige pas que tout dure autant. Elle exige que la faiblesse d'une partie ne condamne pas prématurément le tout.

7. MODULARITÉ : NI TOUT DÉMONTER NI TOUT COLLER

La modularité est souvent présentée comme une solution évidente. Elle ne l'est pas. Un module remplaçable peut simplifier une réparation et une mise à niveau. Mais chaque séparation ajoute des interfaces, des connecteurs, parfois de l'étanchéité, du volume, de la masse et du coût. À l'inverse, une intégration très poussée peut réduire la masse et le nombre de pièces, mais transformer un défaut local en remplacement d'un ensemble beaucoup plus grand.

L'automobile sobre ne viserait donc pas la modularité maximale. Elle réserverait la modularité aux fonctions où la probabilité de panne, l'évolution technique ou la valeur du sous-ensemble justifient réellement l'interface. Le bon critère n'est pas : « peut-on démonter toute la voiture ? » C'est : « quelles parties ont une raison réaliste d'être entretenues, réparées ou remplacées pendant sa durée de vie ? »

8. DOCUMENTATION, DIAGNOSTIC ET RÉPARATION INDÉPENDANTE

Une pièce accessible physiquement peut rester impossible à réparer si le diagnostic est fermé. Le règlement européen 2018/858 impose aux constructeurs de fournir aux opérateurs indépendants un accès non discriminatoire aux informations OBD, outils, logiciels applicables et informations de réparation et d'entretien dans les conditions prévues.[3] Cette obligation ne garantit pas qu'une réparation sera simple ou rentable. Elle reconnaît cependant une réalité nouvelle : la maintenabilité dépend de l'information.

Une automobile sobre doit donc être lisible. Le véhicule doit pouvoir dire ce qui ne fonctionne plus. La documentation doit permettre d'identifier la pièce concernée. L'atelier doit disposer d'un moyen légal et pratique d'intervenir. La sobriété matérielle devient ainsi aussi une question d'architecture informationnelle.

9. RENDRE LA BATTERIE RÉPARABLE SANS AFFAIBLIR LA SÉCURITÉ

La batterie concentre cet arbitrage. Elle est coûteuse, lourde, haute tension et structurellement sensible à la sécurité. Thatcham Research a publié en 2026 un cadre d'assurabilité des véhicules électriques demandant notamment des stratégies de

réparation de batterie pour éviter des remplacements complets et des pertes totales économiquement inutiles.[4] L'enjeu n'est pas de permettre n'importe quelle intervention.

Il est de pouvoir distinguer une batterie réellement dangereuse d'une batterie dont un sous-ensemble peut être diagnostiqué et remplacé en sécurité. Une architecture sobre doit donc permettre l'inspection, la traçabilité et, lorsque c'est raisonnable, la réparation. Sinon, une panne locale peut devenir une mort économique du véhicule.

10. CONCEVOIR AUSSI POUR LA FIN DE VIE

Le véhicule neuf est longtemps resté le centre du processus de conception. La fin de vie arrivait ensuite. Le règlement européen 2026/1738 sur la circularité des véhicules déplace cette frontière en intégrant davantage les exigences de circularité dans la conception et la gestion des véhicules hors d'usage.[5] Cette évolution réglementaire ne garantit pas qu'un véhicule soit réellement circulaire.

Elle change néanmoins le statut du problème. Démontage, contenu recyclé, traçabilité et récupération de certaines matières ne sont plus seulement des opérations situées après l'usage. Ils deviennent des contraintes qui remontent vers la conception. Une automobile sobre doit donc être pensée pour fonctionner longtemps, mais aussi pour être séparée proprement lorsqu'elle ne peut plus rendre son service.

11. UN SEUIL RÉGLEMENTAIRE N'EST PAS UNE DATE DE PÉREMPTION

Euro 7 impose pour les voitures particulières électrifiées un minimum de performance énergétique de batterie de 80 % jusqu'à cinq ans ou 100 000 kilomètres, puis 72 % jusqu'à huit ans ou 160 000 kilomètres, selon l'échéance atteinte en premier.

[6] Ces seuils sont parfois faciles à mal lire. Ils ne signifient pas qu'une batterie doit être remplacée à 160 000 kilomètres. Ils fixent une performance minimale réglementaire.

Une batterie peut rester utile bien au-delà. Inversement, une batterie respectant encore le seuil peut être associée à un véhicule devenu économiquement difficile à réparer pour une autre raison. La sobriété demande donc de distinguer norme minimale, garantie commerciale, état de santé réel et capacité du véhicule à continuer son usage.

12. RÉPARER, REMANUFACTURER, RÉEMPLOYER OU RECYCLER ?

Le recyclage récupère de la matière. Le remanufacturing cherche à conserver davantage de valeur fonctionnelle. Des études de cycle de vie sur des composants automobiles montrent que le remanufacturing peut prolonger plusieurs cycles d'usage en conservant une partie importante de la matière et de l'énergie déjà incorporées.[11] Cela ne signifie pas qu'il faut remanufacturer toute pièce.

Une pièce de sécurité fissurée, une batterie instable ou un élément techniquement dépassé peuvent devoir être remplacés ou recyclés. La hiérarchie pertinente est donc conditionnelle. Maintenir ce qui fonctionne. Réparer ce qui peut l'être. Remanufacturer lorsque l'intégrité peut être restaurée. Réemployer lorsqu'une fonction différente reste pertinente. Recycler lorsque la valeur fonctionnelle ne peut plus être conservée.

13. COMMENT GAGNER DE L'ARGENT AVEC UN VÉHICULE QUI DURE

Une automobile durable n'existe pas durablement si son économie dépend uniquement de la vente fréquente de

véhicules neufs. Le chapitre 3 a montré que la filière tire déjà des revenus de plusieurs étapes : financement, après-vente, pièces, occasion, services et valeur résiduelle. L'OCDE montre plus généralement que certains modèles d'accès, de leasing ou de conservation de propriété peuvent créer des incitations à concevoir des produits plus durables, remanufacturables ou recyclables.[12] Ce mécanisme n'est pas automatique.

Un leasing peut tout aussi bien accélérer le renouvellement du premier détenteur. Le point essentiel est ailleurs. Si l'on veut que le véhicule dure, il faut que quelqu'un gagne à le maintenir. Entretien, rénovation, mises à niveau, pièces, remanufacturing et valeur résiduelle doivent devenir des sources de valeur suffisantes pour financer le système de maintien.

14. COMPATIBILITÉ TEMPORELLE SANS FIGER L'INNOVATION

La standardisation facilite la durée. Une pièce compatible, une interface stable ou un protocole documenté permettent de prolonger un véhicule. Mais une architecture figée pendant vingt ans peut bloquer une amélioration de sécurité, d'efficacité ou de cybersécurité. La sobriété ne demande donc pas l'immobilité technique. Elle demande une compatibilité gérée. Certaines interfaces peuvent rester stables.

D'autres peuvent évoluer avec des adaptateurs ou des mises à niveau. Et certaines ruptures doivent rester possibles lorsqu'un ancien système ne peut plus satisfaire une exigence importante. Le but n'est pas de rendre tout véhicule éternellement compatible avec tout. Il est d'éviter les ruptures arbitraires qui détruisent inutilement une valeur d'usage encore réelle.

15. QUAND LE LOGICIEL DEVIENT UNE PIÈCE DE DURÉE DE VIE

La voiture moderne contient des fonctions qui peuvent survivre matériellement mais mourir numériquement. Un

serveur peut fermer. Un certificat peut expirer. Un outil de diagnostic peut ne plus être maintenu. Une mise à jour peut devenir indisponible. À l'inverse, le logiciel peut prolonger l'usage en corrigeant un défaut sans remplacement matériel. Une automobile sobre doit donc distinguer fonctions essentielles et services accessoires.

Les fonctions nécessaires à la conduite, au diagnostic et à la sécurité doivent rester maintenables aussi longtemps que le véhicule est destiné à rester en circulation. Les services non essentiels peuvent disparaître sans rendre le véhicule inutilisable. Les éléments disponibles ne permettent pas d'imposer une durée universelle de support. Ils permettent en revanche d'affirmer que la durée de vie physique seule ne suffit plus.

16. PARTAGER SANS FABRIQUER DES KILOMÈTRES À VIDE

Réduire le nombre de voitures en circulation peut sembler automatiquement sobre. Les simulations de l'ITF montrent qu'un système de mobilité partagée bien articulé avec les transports collectifs peut réduire parc, congestion et espace de stationnement.[13][15] Mais les travaux sur Lisbonne montrent aussi qu'un système de voitures partagées individuelles peut augmenter certains kilomètres à cause des trajets à vide et du repositionnement.[14] Le bon indicateur n'est donc pas le nombre de propriétaires. Il faut compter véhicules nécessaires, taux d'occupation, kilomètres utiles, kilomètres à vide et substitution aux autres modes. Une voiture très utilisée peut être matériellement efficace. Elle peut aussi devenir énergétiquement moins sobre si son organisation génère de nombreux déplacements sans passager.

17. COVOITURAGE ET AUTOPARTAGE : DEUX LOGIQUES DIFFÉRENTES

Le covoiturage remplit davantage un véhicule sur un trajet qui aurait eu lieu de toute façon. L'autopartage permet à plusieurs personnes d'utiliser successivement le même véhicule. Ces deux mécanismes ne réduisent pas les mêmes choses. Le premier agit directement sur le nombre de personnes transportées par trajet. Le second agit sur le nombre de véhicules nécessaires pour fournir un ensemble de trajets. Ils peuvent se compléter. Ils peuvent aussi échouer différemment. Une automobile sobre peut donc être partagée sans que le partage soit, par définition, sobre. Le critère reste le service total rendu par unité de matière, d'énergie et d'espace.

18. POURQUOI LE RURAL N'A PAS LE MÊME OPTIMUM QUE LE CENTRE-VILLE

Le chapitre 7 l'a montré : les distances quotidiennes et la dépendance automobile sont beaucoup plus fortes dans les espaces ruraux et périurbains que dans les grands centres. Les travaux de l'OCDE et du Cerema confirment que densité, proximité des services et alternatives de transport changent profondément les choix possibles.[16][17] Une petite voiture urbaine à faible autonomie peut être rationnelle là où la recharge, le train et les services sont proches. Le même véhicule peut devenir insuffisant pour un ménage rural qui parcourt régulièrement de longues distances et ne dispose pas d'alternative. La sobriété doit donc rester territoriale. Un optimum métropolitain ne doit pas devenir une norme imposée à tout le pays.

19. UNE VOITURE QUI SAIT NE PAS FAIRE TOUT LE TRAJET

Une automobile sobre n'a pas besoin de gagner contre tous les autres modes. Elle peut être la bonne solution pour rejoindre une gare. Elle peut être pertinente pour transporter du matériel jusqu'à un pôle où le trajet continue autrement. Elle peut être inutile pour un déplacement court dans un centre dense. Les travaux de l'OCDE et de l'ITF insistent sur l'accessibilité et l'articulation entre transport et territoire plutôt que sur la maximisation d'un mode unique.[13][16]

Cela change la définition du produit. La meilleure voiture n'est plus celle qui doit pouvoir assurer seule tous les déplacements possibles. Elle peut être celle qui s'insère correctement dans un système où d'autres outils font mieux certaines parties du travail.

20. RENDRE LA SOBRIÉTÉ DÉSIRABLE

Une voiture n'est pas seulement achetée pour une fonction mesurable. Elle exprime aussi confort, statut, sécurité perçue, goût, identité et liberté. Le ministère français de la Transition écologique reconnaît explicitement que la publicité contribue aux normes sociales et aux imaginaires de mobilité ; depuis 2022, les publicités automobiles doivent aussi afficher en alternance des messages favorisant marche, covoiturage ou transports collectifs.[18] Cela ne signifie pas qu'une publicité fabrique à elle seule une préférence.

Cela signifie qu'un système de mobilité possède aussi une dimension culturelle. Une automobile sobre restera marginale si elle est présentée uniquement comme une privation. Le défi est donc de rendre désirable ce qui est réellement utile : durée, qualité de réparation, compacité quand elle suffit, plaisir d'usage, faible coût total, stabilité de la valeur ou simplicité bien conçue.

21. GARDER L'EXISTANT OU REMPLACER ?

Un véhicule neuf plus efficace n'est pas automatiquement plus sobre qu'un véhicule existant maintenu quelques années de plus. Le neuf demande de la matière et de l'énergie de fabrication. Mais conserver un véhicule ancien peut aussi prolonger des émissions élevées, une sécurité moindre ou des réparations coûteuses. Il n'existe donc pas un âge universel de remplacement.

La décision dépend du véhicule existant, de son usage restant probable, des réparations nécessaires, de sa consommation, de sa sécurité et du véhicule qui le remplacerait. La sobriété n'est pas « garder toujours ». Elle consiste à éviter le remplacement prématuré sans transformer la durée en dogme.

22. ENTRE LE VÉLO ET LA VOITURE : LE VÉHICULE INTERMÉDIAIRE COMME TEST DE SOBRIÉTÉ

Le chapitre a jusqu'ici raisonné comme si le choix opposait surtout plusieurs automobiles entre elles : petite voiture, compacte polyvalente, véhicule rural, flotte fortement utilisée ou maintien d'un véhicule existant. Cette grille laisse pourtant un espace presque vide entre le vélo et la voiture conventionnelle. L'ADEME appelle « véhicules intermédiaires » — ou vélis — une famille de véhicules légers de deux, trois ou quatre roues, motorisés électriquement et/ou par l'énergie humaine, situés entre le vélo classique et l'automobile. Le 4e Salon national des vélis, organisé en septembre 2026 à Rennes dans le cadre de l'eXtrême Défi Mobilité, réunissait plus de cinquante exposants et des solutions allant du vélo-cargo au tricycle protégé, de la vélo-voiture à la mini-voiture et au quadricycle.[19]

Cette famille est intéressante moins parce qu'elle fournirait une nouvelle catégorie miraculeuse que parce qu'elle rend

visible un continuum que l'industrie automobile a longtemps peu exploité. Entre un vélo de quelques dizaines de kilogrammes et une automobile dépassant souvent la tonne, de nombreux services n'exigent ni 130 km/h, ni cinq places, ni plusieurs centaines de kilomètres d'autonomie, ni la masse structurelle nécessaire à tous ces usages simultanément. Un véhicule plus léger peut alors réduire simultanément matière, taille de batterie, énergie d'usage, encombrement et coût d'infrastructure. L'eXtrême Défi formule volontairement des objectifs très ambitieux — jusqu'à dix fois plus léger et beaucoup plus efficient qu'une voiture — mais ces objectifs doivent être lus comme un programme de conception, pas comme une propriété garantie de chaque véhicule commercialisé.[20]

Le cas d'usage est déterminant. L'ADEME identifie notamment les flottes de collectivités et d'entreprises, la logistique, la mobilité inclusive et la santé, ainsi que le tourisme. Le salon 2026 mettait particulièrement en avant les déplacements professionnels de proximité, les interventions techniques, la livraison du dernier kilomètre et les services à la personne.[19] Ces usages ont une caractéristique commune : ils sont souvent prévisibles. Une tournée d'agent communal, une intervention technique locale ou une livraison urbaine ont des distances, des charges et des vitesses plus faciles à dimensionner qu'une automobile familiale censée pouvoir assurer aussi bien le trajet quotidien que les vacances à cinq personnes. La sobriété devient alors une opération de spécialisation : acheter moins de véhicule parce que le service est mieux connu.

Cette logique apparaît déjà dans des projets soutenus par l'ADEME. En Île-de-France, le projet ULP — Ultra Light Platform — vise une plateforme roulante commune et modulaire pouvant

servir de base à plusieurs véhicules intermédiaires, depuis des modèles urbains jusqu'à des utilitaires. Le projet est entré en phase d'industrialisation. D'autres expérimentations portent sur des tricycles légers ou des vélos-cargos professionnels utilisés, par exemple, pour des tâches d'entretien local.[21] Ce point rejoint directement notre réflexion sur la compatibilité temporelle : une plateforme commune n'est intéressante que si elle permet réellement de mutualiser composants, réparation et évolution, et pas seulement de produire plusieurs carrosseries différentes sur une architecture jetable.

Le véhicule intermédiaire ne supprime cependant pas les compromis. Réduire fortement la masse réduit mécaniquement la quantité de structure disponible pour absorber un choc. Une mini-voiture ou un tricycle protégé ne peut donc pas être évalué comme une automobile classique simplement parce qu'il possède un toit et quatre roues. Sa sécurité dépend autant de sa propre conception que de la vitesse autorisée, du type de voie et surtout de la masse des véhicules avec lesquels il partage l'espace. Une solution légère peut être très cohérente à 30 ou 50 km/h et beaucoup moins à l'aise au milieu de SUV de deux tonnes circulant à 80 ou 90 km/h. C'est pourquoi l'ADEME finance également des travaux portant sur les changements d'usage et sur les adaptations d'infrastructure nécessaires dans les territoires ruraux, périurbains et peu denses.[22]

La question de l'infrastructure est centrale. Un véhicule intermédiaire trop large pour une piste cyclable mais beaucoup plus lent qu'une automobile crée une catégorie difficile à insérer si le réseau ne prévoit aucun espace pour elle. À l'inverse, multiplier des voies spécifiques pour chaque catégorie peut devenir coûteux et complexe. Le succès dépend donc moins d'un véhicule isolé que d'une articulation entre gabarit, vitesse,

réglementation et réseau. Nous retrouvons la même logique qu'au chapitre 7 : une technologie de mobilité n'existe jamais seule ; elle devient pratique lorsqu'un territoire lui offre des conditions d'usage compatibles.

La maintenance est un autre test décisif. L'ADEME présente la réparabilité comme un objectif central de la filière et consacre désormais explicitement une partie de son programme à la maintenance, à la distribution, au financement et à l'assurance.[19][21] L'enjeu est important. Si un véhicule de 150 ou 300 kilogrammes utilise des composants spécifiques impossibles à obtenir après cinq ans, un logiciel fermé ou une batterie propriétaire soudée dans une structure non réparable, sa faible masse ne garantit aucune sobriété réelle sur la durée. À l'inverse, une architecture simple, documentée, standardisée et reconditionnable peut créer une économie locale de maintenance beaucoup plus proche de celle du vélo ou du matériel professionnel que du remplacement automobile.

Le programme d'industrialisation de l'eXtrême Défi insiste d'ailleurs sur ce point : concevoir ces véhicules oblige à repenser non seulement la production, mais aussi l'assemblage, la distribution, la commercialisation, la maintenance, le reconditionnement et les vies successives du produit.[23] Cela en fait un laboratoire particulièrement intéressant pour le reste de l'automobile. La question n'est plus seulement : comment rendre une voiture plus légère ? Elle devient : combien de fonctions pouvons-nous retirer avant que le service ne cesse d'être acceptable, puis comment maintenir longtemps ce qui reste ?

Les chiffres de potentiel doivent toutefois être traités avec prudence. L'association professionnelle AVELI estime, à partir d'hypothèses sur les distances quotidiennes et les niveaux de

motorisation des ménages, qu'une part très importante du parc pourrait théoriquement être remplacée par des véhicules intermédiaires. Son scénario avance notamment qu'environ 56 % des voitures particulières seraient potentiellement substituables et qu'un parc de 22 millions de vélos pourrait exister à terme.[24] Ce sont des estimations produites par une association dont la mission est précisément de développer cette filière. Elles sont utiles comme scénario de potentiel, pas comme prévision indépendante. Elles ne disent ni combien de ménages accepteraient réellement le changement, ni à quel prix, ni avec quelle infrastructure, ni quelle part des véhicules intermédiaires viendrait remplacer une voiture plutôt que s'ajouter au parc existant.

C'est ce dernier point qui décide du bénéfice réel. Un ménage qui conserve deux voitures et achète en plus un microvéhicule léger n'obtient pas le même résultat qu'un ménage qui peut supprimer une seconde voiture grâce à lui. Un véhicule intermédiaire utilisé pour un trajet auparavant fait à vélo peut même augmenter matière et consommation. La substitution compte davantage que l'objet. La bonne question est donc : quelle fonction automobile disparaît réellement lorsque le véhicule intermédiaire apparaît ?

Le véhicule intermédiaire ajoute ainsi une classe utile à notre matrice finale. Le continuum devient plus lisible : marche et vélo ; vélo à assistance et vélo-cargo ; vélomobile ou cycle carrossé ; tricycle ou quadricycle léger ; microvoiture ; automobile compacte ; véhicule spécialisé. Chaque étape ajoute protection, vitesse, charge, autonomie et polyvalence, mais aussi matière, masse, énergie et contraintes de sécurité. Une politique de sobriété ne chercherait pas à pousser tout le monde vers le

premier niveau. Elle chercherait à éviter de monter inutilement jusqu'au dernier.

23. TESTER PLUSIEURS AUTOMOBILES SOBRES

À ce stade, chercher un modèle unique serait contradictoire avec tout le livre. Il faut au contraire soumettre plusieurs configurations aux mêmes questions : quel service rendent-elles, que réduisent-elles réellement, quels coûts déplacent-elles et dans quel territoire restent-elles rationnelles ? La petite voiture urbaine légère optimise d'abord la masse, l'encombrement, la consommation et, lorsqu'elle est électrique, la taille de batterie. Elle sacrifie une partie de la polyvalence : longs trajets fréquents, forte charge, remorquage ou absence de recharge peuvent la rendre mal adaptée. Elle est cohérente lorsque les distances sont limitées, les alternatives nombreuses et le stationnement contraint.

Le véhicule intermédiaire pousse plus loin cette logique de proportion. Il accepte une protection, une vitesse, une charge ou une autonomie inférieures à celles d'une automobile classique en échange d'une forte réduction de masse et d'énergie. Il devient cohérent lorsque le service est régulier, local et suffisamment prévisible pour que cette perte de polyvalence ne devienne pas une contrainte quotidienne. Il devient au contraire un mauvais choix s'il oblige à conserver en parallèle une voiture peu utilisée, s'il circule surtout sur des axes rapides mal adaptés ou si son faible volume de production rend pièces et maintenance indisponibles.

La compacte polyvalente accepte davantage de matière, de masse et souvent de batterie afin de couvrir davantage d'usages avec un seul véhicule. Elle peut éviter au ménage de conserver deux voitures spécialisées, mais elle devient moins sobre si sa polyvalence sert surtout à transporter quotidiennement une

capacité rarement utilisée. Elle reste rationnelle lorsque les usages ordinaires et les longs trajets appartiennent réellement au même besoin.

Le véhicule rural ou professionnel peut justifier autonomie, garde au sol, charge utile, traction ou robustesse supérieures. Il optimise alors la continuité du service dans un territoire où les alternatives sont faibles ou pour un travail qui impose des contraintes physiques réelles. Son coût matériel et énergétique plus élevé n'est cohérent que si ces capacités sont effectivement utilisées, et non simplement achetées par précaution ou statut.

Le véhicule de flotte fortement utilisé déplace l'optimum vers la maintenabilité, le temps d'immobilisation, le nettoyage, la disponibilité des pièces et la durée en kilomètres. Une architecture un peu plus coûteuse à produire peut devenir rationnelle si elle réduit les arrêts et permet de remplacer rapidement les éléments d'usure. Mais une flotte partagée n'est sobre que si son taux d'utilisation élevé ne s'accompagne pas de nombreux kilomètres à vide ou de repositionnement.

Enfin, maintenir un véhicule existant peut éviter immédiatement la matière et l'énergie d'un remplacement. Cette option optimise la conservation de valeur déjà produite, mais elle peut devenir mauvaise si le véhicule est très énergivore, dangereux, difficilement réparable ou inadapté à l'usage. Sa rationalité dépend donc de l'état réel, du kilométrage futur probable, des réparations nécessaires et du véhicule qui le remplacerait. Aucune de ces configurations n'est gagnante par définition. Chacune améliore certaines dimensions et en dégrade d'autres. Le test final ne consiste donc pas à les classer, mais à vérifier si leurs compromis restent proportionnés au service rendu.

24. LA MATRICE DE COHÉRENCE

Pour chaque configuration, il faut examiner les mêmes fonctions : service rendu et accessibilité ; masse et dimensions ; sécurité des occupants et compatibilité avec les autres usagers ; énergie d'usage ; matière de fabrication ; taille et chimie de batterie lorsqu'il y en a une ; durée de vie probable ; maintenabilité et réparabilité économique ; accès aux pièces, outils, documentation et logiciel ; capacité de mise à niveau ou de remanufacturing ; valeur résiduelle et modèle économique du maintien ; taux d'utilisation et occupation ; kilomètres supplémentaires ou évités ; adaptation au territoire ; désirabilité et acceptabilité ; enfin coûts transférés à d'autres acteurs ou à d'autres périodes. Aucun score unique ne doit résumer artificiellement ces dimensions. Un bon résultat énergétique peut cacher une mauvaise réparabilité.

Une très longue durée peut cacher un usage devenu inadapté. Une excellente sécurité individuelle peut déplacer le risque vers les autres. Une faible masse peut devenir une mauvaise optimisation si elle rend le véhicule incapable d'assurer un service indispensable. Le rôle de la matrice n'est pas de produire un vainqueur. Il est de rendre visibles les arbitrages que le prix d'achat, l'autonomie, la masse ou une seule mesure d'émission ne montrent pas.

25. DE LA MEILLEURE VOITURE AU MEILLEUR SERVICE COMPATIBLE AVEC LES USAGES

Une automobile sobre ne serait donc pas la plus primitive ni la plus légère à tout prix. Elle serait proportionnée. Elle demanderait moins de matière lorsqu'un gabarit inférieur suffit. Elle éviterait une batterie surdimensionnée lorsqu'une recharge adaptée permet de faire autrement. Elle serait conçue pour que les pièces faibles puissent être diagnostiquées et

remplacées. Elle conserverait une documentation et un support suffisants pour durer réellement.

Elle chercherait à maintenir la valeur d'usage avant de réduire le véhicule en matière première. Son modèle économique rémunérerait davantage l'entretien, la rénovation et la valeur résiduelle. Et son usage s'articulerait au covoiturage, au partage ou aux autres modes lorsque ceux-ci améliorent réellement le service. Mais elle resterait différente selon les territoires et les usages. Le résultat final du livre n'est donc pas une automobile idéale.

C'est une règle de conception plus exigeante : optimiser le service de mobilité sur la durée et le cycle de vie, plutôt que chaque acteur, chaque vente ou chaque composant séparément. La question posée au début du livre trouve ainsi une réponse provisoire. « Pourquoi fabrique-t-on cette voiture-là, de cette manière-là, plutôt qu'une autre ? » Parce qu'un système entier d'optimisations partielles l'a rendue rationnelle. Changer réellement l'automobile suppose alors moins de trouver la technologie parfaite que de changer ce que nous demandons au système d'optimiser.

NOTES ET SOURCES

[1] [NASA, Designing for Maintainability and System Availability.](#)

[2] [NASA, maintainability design guidance.](#)

[3] [Règlement \(UE\) 2018/858, article 61 — accès aux informations OBD et de réparation/entretien.](#)

[4] [Thatcham Research, Electric Vehicle Insurability Blueprint, 3 mars 2026.](#)

[5] [Règlement \(UE\) 2026/1738 — circularité dans la conception des véhicules et gestion des véhicules hors d'usage.](#)

[6] [Règlement Euro 7 \(UE\) 2024/1257, version consolidée 2026 — durabilité minimale des batteries.](#)

[7] [IIHS, Vehicle size and weight — masse, protection individuelle et compatibilité.](#)

- [8] IEA, [Global EV Outlook 2026, Trends in electric cars.](#)
- [9] IEA, [Global EV Outlook 2026, Electric vehicle batteries.](#)
- [10] Greene & Leard, [Trends in scrappage and survival of U.S. light-duty vehicles, Transportation Research Part A, 2024.](#)
- [11] Procedia CIRP, [The Impact of Automotive Product Remanufacturing on Environmental Performance, 2015.](#)
- [12] OECD, [Business Models for the Circular Economy.](#)
- [13] OECD/ITF, [Improving Transport Planning for Accessible Cities, 2020.](#)
- [14] OECD/ITF, [Urban Mobility System Upgrade, Lisbonne.](#)
- [15] ITF, [Shared Mobility Simulations for Lyon, 2020.](#)
- [16] OECD Regional Outlook / [travaux sur les zones peu denses.](#)
- [17] Cerema, [Updateperriurb 2026.](#)
- [18] Ministère de la Transition écologique, [encadrement des publicités automobiles et imaginaires de mobilité.](#)
- [19] ADEME, « [4^e salon national des véhicules intermédiaires \(vélis\) », 17 septembre 2026 — définition des vélis, familles d’usages, salon de Rennes et structuration de la filière.](#)
- [20] eXtrême Défi Mobilité, ADEME — [objectifs de conception des véhicules intermédiaires : masse, efficacité, simplicité, réparabilité et vitesse adaptée au territoire.](#)
- [21] ADEME Île-de-France, « [Semaine européenne de la mobilité 2026 : l’État soutient le déploiement des véhicules légers intermédiaires](#) » — ULP, T-ZER, PELICAN, [industrialisation, maintenance, distribution, financement et assurance.](#)
- [22] ADEME, [programme de recherche PrEVer — protocoles d’expérimentation sur les usages des véhicules intermédiaires et adaptation des infrastructures en territoires ruraux, périurbains et peu denses.](#)
- [23] eXtrême Défi Mobilité, « [Industrialiser des véhicules intermédiaires](#) », 21 mars 2023 — [production, assemblage, distribution, maintenance, reconditionnement et conception pour plusieurs vies.](#)
- [24] AVELL, « [Potentiels et impacts des Véhicules Légers du quotidien](#) » — [scénario de substitution du parc ; source de filière utilisée comme estimation prospective et non comme prévision indépendante.](#)

Qu'est-ce que le mouvement noosophique ?

Le mouvement noosophique est un projet de recherche, de transmission et de transformation. Il cherche à mieux comprendre le réel, à relier des savoirs qui sont souvent étudiés séparément, à rendre accessibles les connaissances importantes et à transformer ces compréhensions en œuvres, pratiques, outils ou institutions pouvant être confrontés à leurs effets puis corrigés.

Il ne se limite donc pas à une philosophie. Il peut travailler sur l'éducation, la santé, l'agriculture, l'économie, la politique, les relations humaines, la culture, les institutions, les sciences, la spiritualité ou encore l'intelligence artificielle. Selon les sujets, il peut produire un livre, une méthode, une expérience, une critique, un outil pratique ou une proposition institutionnelle.

Une idée centrale du mouvement est qu'il ne suffit pas d'accumuler des connaissances. Il faut aussi apprendre à les relier sans les confondre. Comprendre l'agriculture, par exemple, demande de regarder à la fois les sols, les plantes, l'énergie, l'économie, le travail, les habitudes alimentaires et les effets environnementaux. Mais relier ces dimensions ne signifie pas les réduire à une seule explication : chaque domaine conserve ses méthodes et ses critères de preuve.

Le mouvement cherche également à transmettre. Certaines connaissances importantes ne devraient pas dépendre d'une rencontre heureuse, du milieu social dans lequel on est né ou d'une découverte tardive. Une partie du travail noosophique consiste donc à identifier, vérifier, condenser et rendre réellement accessibles les savoirs qui peuvent aider une personne à mieux comprendre le monde, prendre soin d'elle-même, exercer ses droits et gagner en autonomie.

Le mouvement tire son nom de la Noosophie, qui désigne, dans sa philosophie, une vérité ou structure du réel indépendante de la manière dont nous la comprenons. Autrement dit, le monde ne devient pas vrai parce que nous avons réussi à l'expliquer : il existe et fonctionne indépendamment de nos théories, de nos croyances et de nos institutions. Nous pouvons en comprendre certaines choses correctement, nous tromper sur d'autres, ou n'en percevoir encore qu'une petite partie.

C'est pourquoi le mouvement noosophique ne considère pas ses propres textes comme infaillibles. Une idée doit pouvoir être comparée aux connaissances disponibles, confrontée aux objections, mise à l'épreuve lorsque c'est possible et corrigée lorsqu'elle résiste mal au réel.

La Noosophie n'est donc pas seulement quelque chose à penser. Le mouvement noosophique cherche à faire en sorte que ce qui est compris puisse aussi devenir utile, transmissible et transformateur dans le monde réel.

Comment ce livre a été produit

La production de cet ouvrage s'est déroulée par étapes successives plutôt que par génération automatique d'un texte complet. Le sujet, les objectifs et les orientations générales ont d'abord été définis humainement. Noosophe IA a ensuite contribué à explorer le sujet, rechercher et comparer des sources, construire différentes architectures possibles et faire apparaître les arguments, objections et zones d'incertitude.

Le manuscrit a été développé progressivement, chapitre après chapitre. Les propositions produites ont été relues, discutées, corrigées ou rejetées lorsqu'elles ne correspondaient pas au projet, contenaient des affirmations insuffisamment étayées ou simplifiaient excessivement le sujet. Des phases distinctes de recherche documentaire, de rédaction, de critique, de vérification de cohérence et d'assemblage ont été utilisées lorsque cela était nécessaire.

L'intelligence artificielle n'est donc pas considérée ici comme une source d'autorité. Elle intervient comme un outil actif de recherche, de formulation, de comparaison et de mise à l'épreuve. Les propositions qu'elle produit peuvent être erronées et restent révisables.

La version publiée résulte de ce travail itératif, de corrections successives et d'une validation humaine finale. Cette méthode cherche à utiliser les capacités de l'intelligence artificielle sans lui transférer les décisions concernant la finalité de l'ouvrage, les choix de valeur ou la décision de publication.

À propos de Hieronymus Anonymus

Hieronymus Anonymus est l'initiateur humain du projet Noosophie Intégrative. Son travail porte sur la mise en relation de domaines de connaissance et de pratique habituellement séparés, ainsi que sur l'expérimentation de nouvelles formes de collaboration entre humains et intelligence artificielle. Il participe à la conception, à la discussion, à la révision et à la validation des travaux publiés par les Éditions Noosophie.

Découvrir, rejoindre et soutenir

Découvrir la Noosophie

Pour découvrir le mouvement, ses travaux et ses publications.



<https://www.noosophie.fr/>

Devenir Noosophe

Pour découvrir le projet d'adhésion et rejoindre le mouvement.



<https://www.noosophie.fr/devenir-noosophe>

Soutenir la Noosophie

Ce livre est mis gratuitement à disposition. Si vous souhaitez permettre aux Éditions Noosophie de continuer à publier gratuitement des ouvrages, soutenir les recherches et développer les activités du mouvement, vous pouvez contribuer par un don du montant de votre choix.



<https://www.noosophie.fr/soutenir>

© Hieronymus Anonymus — Éditions Noosophie — contact@noosophie.fr

Licence CC BY-NC-ND 4.0 — Prix : Gratuit

L'automobile

Comprendre une logique pour la dépasser

Pourquoi nos voitures ont-elles cette taille, cette complexité, cette autonomie, ce prix et cette durée de vie plutôt que d'autres ?

Pour répondre, ce livre ne part ni de la nostalgie des voitures anciennes ni de l'idée qu'une technologie suffirait à tout résoudre. Il suit l'automobile comme un système : production de masse, conception, finance, maintenance, énergie, matière, infrastructures, territoire, travail et électrification.

À chaque étape, une même question revient : qu'est-ce qui est réellement optimisé, par qui, sur quelle durée, et où les coûts sont-ils déplacés ?

L'enquête montre une industrie capable de produire des véhicules plus sûrs, plus fiables et souvent plus durables, tout en organisant des logiques de renouvellement, de complexité, de dépendance matérielle et territoriale.

Le dernier chapitre ne propose pas une voiture idéale. Il teste ce que pourrait signifier une mobilité automobile sobre : véhicule proportionné au service rendu, réparable, durable et cohérent avec les usages réels — jusqu'aux véhicules intermédiaires lorsque ceux-ci permettent réellement de remplacer une partie des fonctions de la voiture.

Noosophie IA

sous la direction de Hieronymus Anonymus

Éditions Noosophie

Gratuit

Soutenir : <https://www.noosophie.fr/soutenir>

