

futuribles

L'anticipation au service de l'action

Mars-avril 2023 • numéro 453



Intelligence artificielle : quels freins ?

**Les nouvelles routes de la soie,
10 ans après**

**Transports et mobilités postcarbone :
scénarios aux horizons 2040-2060**

**Europe : les difficultés
de recrutement**

futuribles

L'anticipation au service de l'action

Principale revue de prospective en langue française à caractère réellement interdisciplinaire, *Futuribles* analyse ce qui peut advenir (les futurs possibles) et ce qui peut être fait (les politiques et les stratégies) vis-à-vis des grands défis du futur.

Diffusion

• En kiosque : À juste titres - Alicia Abadie
Tél. : + 33 (0)4 88 15 12 47 - E-mail : aabadie@ajustetitres.fr

Information, modification de service ou réassort :
www.direct-editeurs.fr

Titre distribué par MLP

• En librairie : Futuribles - Tél. : + 33 (0)1 53 63 37 73
E-mail : ahouguenague@futuribles.com

Revue bimestrielle

Futuribles - 47, rue de Babylone - 75007 Paris - France
Tél. : + 33 (0)1 53 63 37 70 - E-mail : revue@futuribles.com
Site Internet : www.futuribles.com

Comité d'orientation : Julie Bouchard, Dominique Bourg, Jean-François Drevet, Jean-Pierre Dupuy, Corinne Lepage, Joël de Rosnay, Alioune Sall, Hedva Sarfati, Jacques Testart.

Comité de rédaction : Sébastien Abis, Isabelle Baraud-Serfaty, Jean-Pierre Bellier, Jean-Yves Boulin, Gilbert Cette, Pierre-Yves Cusset, Julien Damon, Elvire Fabry, Charles du Granrut, Jean Haëntjens, Bruno Hérault, Céline Laisney, Alain Michel, Pierre Papon, Alain Parant, Jacques Theys.

Fondateur - rédacteur en chef : Hugues de Jovenel

Directeur de la publication : François de Jovenel

Rédactrice en chef adjointe - secrétaire de rédaction :
Stéphanie Debruyne

Rédaction : Quentin Bisalli, Cécile Désaunay, Laurie Grzesiak, Marie Ségur

Abonnements - diffusion : Aude Houguenague

Secrétaire générale : Corinne Roëls

Correctrice : Anne De Beer

Les articles signés expriment l'opinion des auteurs et pas nécessairement celle de la revue *Futuribles*. Tous droits de reproduction, même partielle, par quelque procédé que ce soit, réservés pour tout pays.

Abonnements / commandes

Futuribles abonnements • 47, rue de Babylone - 75007 Paris - France • Tél. : + 33 (0)1 53 63 37 70
E-mail : diffusion@futuribles.com • Site Internet : <http://boutique.futuribles.com/>

Abonnement

Édition imprimée de *Futuribles*. Numérique et archives offerts*

	1 an - 6 numéros	2 ans - 12 numéros
Abonnement <i>1 utilisateur</i>	122€	211€
Abonnement professionnel <i>2 à 2 500 utilisateurs**</i>	297€	514€
Enseignant, étudiant <i>Sur justificatif</i>	61€	

Le numéro

Tout pays, port inclus 22€

Édition numérique + archives de la revue *Futuribles**

	1 an - 6 numéros	2 ans - 12 numéros
Abonnement <i>1 utilisateur</i>	115€	199€
Abonnement professionnel <i>2 à 2 500 utilisateurs**</i>	239€	414€
Enseignant, étudiant <i>Sur justificatif</i>	58€	

Tarifs pour tout pays jusqu'au 31/12/2023, TVA 2,1% incluse.

*Crédit d'impôt de 30% du prix de l'abonnement, réservé aux particuliers souscrivant un premier abonnement, payant leurs impôts en France et sous conditions de ressources.
Facture valant reçu fiscal.

**Au-delà, sur devis. Connexion avec une adresse IP au-delà de 10 utilisateurs.

Les articles de la revue *Futuribles* sont indexés dans Public Affairs Information Service (PAIS) Bulletin, CAB Abstracts, CSA Political Science and Government: A Guide to Periodical Literature, World Agricultural Economics and Rural Sociology Abstracts, Références, Généralis, Delphe, Sociological Abstracts, IBZ (Internationale Bibliographie der geistes- und sozialwissenschaftlichen Zeitschriftenliteratur), Scopus.

Toute reproduction ou représentation, intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, de la présente publication, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite (article L. 122-4 du Code de la propriété intellectuelle - CPI) et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (Code de la propriété intellectuelle, article L. 122-5). L'autorisation de reproduire, dans une autre publication (livre ou périodique), un article paru dans la présente publication doit être obtenue auprès de l'éditeur : Aude Houguenague, Futuribles, 47 rue de Babylone, FR-75007 Paris, tél. : + 33 (0)1 53 63 37 73, e-mail : ahouguenague@futuribles.com. L'autorisation d'effectuer des reproductions par reprographie ou électroniques dans le cadre professionnel doit être obtenue auprès

du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, FR-75006 Paris, tél. : + 33 (0)1 44 07 47 70, fax : + 33 (0)1 46 34 67 19, e-mail : contact@cfcopies.com.

Associés principaux :

François de Jovenel, Hugues de Jovenel, Corinne Roëls

Commission paritaire n° 0426 D 80574 - ISSN 0337-307X

Corlet, Zone industrielle Ouest, rue Maximilien-Vox, Condé-sur-Noireau, 14110 Condé-en-Normandie, France
Dépôt légal n° 22100078 • MARS 2023

Illustration de couverture : © Agsandrew / Shutterstock

© *futuribles* SARL 2023

futuribles

Mars-avril 2023 • numéro 453

- 3 | **Éditorial**
Atermoiements
Hugues de Jouvenel
- 5 | Les cinq murs
de l'intelligence artificielle
Bertrand Braunschweig
- 25 | Décarboner les mobilités
Sept scénarios pour la France
aux horizons 2040 et 2060
Dominique Auverlot et Alain Sauvant
- 43 | Quelles technologies pour
décarboner les transports ?
Dominique Auverlot et Alain Sauvant
- 63 | Les nouvelles routes
de la soie, dix ans après
*Barthélémy Courmont, Frédéric Lasserre
et Éric Mottet*
- 77 | **Tribune**
Difficultés de recrutement
des entreprises : une analyse
économique comparative
Antonin Bergeaud et Gilbert Cette
- 89 | **Chronique européenne**
Droits humains ou énergie :
le dilemme
Jean-François Drevet
- 97 | **Actualités prospectives**
Le début de la fin de l'habitat
pavillonnaire en France ? | Existe-t-il
une alternative à la batterie lithium-ion ? |
Les Français et le travail | L'avenir radieux
du fret aérien dans nos achats ? | Fusion
nucléaire : quelles perspectives ?
- 111 | **Lu, vu, entendu**
Marc-Antoine Pérouse de Montclos,
*Un Djihad sans foi ni loi. Ou la guerre
contre le terrorisme à l'épreuve des réalités
africaines* | Jenny Andersson et Sandra
Kemp (sous la dir. de), *Futures* | Corinne
Gaudart et Serge Volkoff, *Le Travail
pressé. Pour une écologie des temps de
travail* | Jacques Attali, *Histoires et avenir
de l'éducation* | Vaclav Smil, *How the World
Really Works: A Scientist's Guide to Our Past,
Present and Future* | Philippe Coulangeon
et alii, *La Conversion écologique des Français.
Contradictions et clivages.*
- 125 | **Abstracts**

Futuribles abonnements • 47, rue de Babylone - 75007 Paris - France
 E-mail : diffusion@futuribles.com • Tél. : + 33 (0)1 53 63 37 70
 Site Internet : <https://boutique.futuribles.com/>

Je m'abonne à l'édition imprimée de la revue *Futuribles* Édition numérique avec archives depuis 1975 offerte*

	1 an - 6 numéros	2 ans - 12 numéros
Abonnement 1 utilisateur	<input type="checkbox"/> 122 €	<input type="checkbox"/> 211 €
Abonnement professionnel 2 à 2500 utilisateurs**	<input type="checkbox"/> 297 €	<input type="checkbox"/> 514 €
Enseignant, étudiant Sur justificatif	<input type="checkbox"/> 61 €	

Je m'abonne à l'édition numérique + archives de la revue *Futuribles**

	1 an - 6 numéros	2 ans - 12 numéros
Abonnement 1 utilisateur	<input type="checkbox"/> 115 €	<input type="checkbox"/> 199 €
Abonnement professionnel 2 à 2500 utilisateurs**	<input type="checkbox"/> 239 €	<input type="checkbox"/> 414 €
Enseignant, étudiant Sur justificatif	<input type="checkbox"/> 58 €	

Je commande les numéros suivants de la revue *Futuribles*

n° 450 n° 451 n° 452 autre(s) _____
 22 € le numéro, tout pays, port inclus

Voici mes coordonnées

Nom - Prénom _____

 Société _____

 N° de TVA _____
 Adresse _____

 Code postal _____
 Ville _____
 Pays _____
 Tél. _____
 E-mail (indispensable pour l'édition numérique) _____

Je règle _____ € par

Chèque à l'ordre de Futuribles
 Visa American Express
 N° _____
 Expire fin [] [] [] []
 Cryptogramme _____
 Virement CIC Paris Bac, France
 IBAN : FR76-3006-6100-4100-0105-7380-116
 BIC : CMCIFRPP
 Sur facture
 Date : _____ Signature

Les données personnelles que vous renseignez, nécessaires pour traiter votre demande, sont destinées à des fins d'exploitation interne ou externe, ou de promotion des activités de Futuribles.

Conformément à la loi du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès, de rectification et de radiation des données fournies à Futuribles - 47 rue de Babylone - Paris - France.

Sauf refus de votre part, ces informations pourront être utilisées par des tiers.

*Crédit d'impôt de 30 % du prix de l'abonnement, réservé aux particuliers souscrivant un premier abonnement, payant leurs impôts en France et sous conditions de ressources. Facture valant reçu fiscal.

**Au-delà, sur devis. Connexion avec une adresse IP au-delà de 10 utilisateurs.

Tarifs pour tout pays jusqu'au 31/12/2023, TVA 2,1% incluse.

Atermoiements

L'éditorial d'Hugues de Jouvenel

Ces derniers mois, le robot conversationnel ChatGPT, apparu fin novembre 2022, a connu un immense succès. Ses performances, qui seront peut-être rapidement dépassées, ont été perçues comme une avancée majeure dans le domaine de l'intelligence artificielle (IA) que des augures estiment destinée un jour à remplacer, sinon dépasser, l'être humain. Mais « méfions-nous des manipulateurs quand ils vous connaissent trop bien », écrit joliment Laurence Devillers (dans *Le Monde* du 6 février 2023) qui nous met opportunément en garde contre une IA devenant si puissante que nous abdiquerions nos libertés. Au demeurant ne prêtons-nous pas à cette IA un pouvoir excessif alors que son développement risque de s'écraser sur cinq murs : ceux de la confiance, de l'énergie, de la sécurité, de l'interaction avec les humains, et de son inhumanité ? Telle est la thèse de Bertrand Braunschweig qui, dans ce numéro, explique ce que sont ces « murs » et examine comment les surmonter afin que l'IA ne sombre pas dans « un troisième hiver » comme elle en a déjà connu.

Pour ne prendre qu'un exemple, les besoins en énergie de l'IA sont énormes alors même que, en Europe du moins, 50 ans après le premier choc pétrolier, nous prenons conscience de notre dépendance énergétique vis-à-vis de l'extérieur et de son corollaire, la hausse des prix, évidemment partiellement liés au conflit en Ukraine et aux mesures adoptées par l'Union européenne à l'encontre de la Russie. Une mesure courageuse, semble penser Jean-François Drevet, qui souligne toutefois le cruel dilemme auquel l'Europe est confrontée : prétendre défendre les droits humains et la démocratie, ou être condamnée à dépendre, pour ses besoins énergétiques, d'approvisionnements en provenance de pays du Moyen-Orient qui ne sont guère plus vertueux que la Russie sur le plan des valeurs. Ce faisant, l'auteur souligne une des grandes faiblesses de l'Europe occidentale face aux deux géants que sont la Chine et les États-Unis.

Nul ne doute qu'il soit urgent de s'affranchir de cette dépendance aux énergies fossiles et de s'orienter vers une société décarbonée : tel est le défi de la « transition écologique ». Mais le chemin sera long et d'autant plus difficile que l'on tardera à l'emprunter. C'est en substance ce que démontrent les articles de Dominique Auverlot et Alain Sauvart sur la prospective des transports et des mobilités en France

aux horizons 2040 et 2060, un secteur qui à lui seul est responsable de 30 % des émissions de gaz à effet de serre de la France. Leur analyse est d'autant plus intéressante qu'elle porte sur l'ensemble des moyens de transport (passagers et marchandises, routier, maritime et aérien), et tient compte du cycle de vie des véhicules et des infrastructures. Les auteurs présentent cinq scénarios exploratoires, en partant de la situation actuelle, construits à partir de différentes hypothèses portant sur les comportements de sobriété et les progrès techniques. Aucun de ces scénarios ne permet d'atteindre les objectifs poursuivis ! Aussi ont-ils construit deux scénarios normatifs (*backcasting*) montrant quels efforts plus intenses de sobriété et quels progrès techniques plus importants seraient nécessaires pour réussir cette transition d'ici 2060. Leur compte à rebours est révélateur de bien des difficultés, deux d'entre elles figurant dans nos « Actualités prospectives » : l'une relative aux alternatives à la batterie lithium-ion qui joue un rôle essentiel dans les véhicules électriques ; l'autre portant sur les coûts induits par l'habitat dispersé qui soulève un problème non moindre d'aménagement du territoire et de logement.

Ces articles soulignent les défis inhérents à la transition écologique. À défaut d'énergie, d'une économie décarbonée et d'une planification stratégique à long terme résolue, les Français se mobilisent actuellement (alors que nous bouclons ce numéro) sur un autre théâtre d'opérations, celui du projet de réforme des retraites qui, comme celle de l'assurance chômage, vise à les inciter à travailler davantage pour mieux équilibrer les comptes sociaux. Nul ne doute que le vieillissement démographique et la dégradation du rapport entre actifs occupés et inactifs allocataires qui l'accompagne posent un problème financier, mais aussi d'adaptation de la société au vieillissement. C'est un fait connu depuis longtemps. Mais la politique que décrivent Antonin Bergeaud et Gilbert Cette, dans leur article sur les difficultés de recrutement, ne suscite manifestement pas un immense enthousiasme !

Une fois encore, le contraste est saisissant entre la détermination de la Chine et des États-Unis d'une part, celle de l'Europe de l'autre. L'ambition des premiers est claire et les moyens qu'ils déploient pour y parvenir sont considérables. En témoigne, par exemple, le programme des nouvelles routes de la soie lancé par la Chine voici 10 ans pour nouer des relations stratégiques et nourrir ses ambitions hégémoniques. Comme le montre l'article de Barthélémy Courmont, Frédéric Lasserre et Éric Mottet, ce programme et sa forme ont certes évolué, mais le cap est tenu... ■

Les cinq murs de l'intelligence artificielle

Par Bertrand Braunschweig ¹

Le lancement, fin novembre 2022, de ChatGPT, un agent conversationnel développé par OpenAI, a fait grand bruit et suscité nombre de reportages et commentaires sur les performances et avancées de l'intelligence artificielle (IA). Pour autant, si les progrès en la matière sont effectivement impressionnants, un certain nombre de limites demeurent, et l'avènement d'une IA totalement autonome et parfaite relève encore de la science-fiction. Ainsi Bertrand Braunschweig, responsable de la coordination scientifique du programme français Confiance.ai, pointe-t-il ici cinq grands « murs » sur lesquels l'IA pourrait bien buter si l'on ne s'y intéresse pas suffisamment. Il présente ces cinq murs, qui sont celui de la confiance envers l'IA, celui de sa consommation énergétique, celui de la sécurité des systèmes qu'elle régit, celui des interactions homme-machine, et enfin celui de l'inhumanité des machines. Puis il propose, en fin d'article, un certain nombre de pistes de travail et de recherche pour répondre aux défis posés par ces cinq murs : amélioration des architectures de réseaux, combinaison de modèles numériques et symboliques, interdisciplinarité renforcée, etc. S.D.

L'intelligence artificielle (IA) progresse à un rythme très rapide tant sur le plan de la recherche que sur celui des applications et pose des questions de société auxquelles toutes les réponses sont loin d'être données. Mais en avançant rapidement, elle fonce sur ce que j'appelle les cinq murs de l'IA, des murs sur lesquels elle est susceptible de se fracasser si l'on ne prend pas de précautions. N'importe lequel de ces cinq murs est en mesure de mettre un terme à sa progression, c'est pour cette raison qu'il est essentiel

1. Coordonnateur scientifique du programme Confiance.ai, programme industriel et académique qui constitue un des trois piliers du Grand Défi sur l'intelligence artificielle prouvable et certifiable. Une version longue de cet article, rédigée courant 2021, a été publiée en six épisodes sur le *blog Binaire* du journal *Le Monde* entre mars et avril 2022 (URL du premier épisode : <https://www.lemonde.fr/blog/binaire/2022/03/01/les-cinq-murs-de-lia/>). Consulté le 25 janvier 2023 ; les épisodes suivants sont sur le même site). Cet article en reprend les principales idées.

d'en connaître la nature et de chercher à apporter des réponses afin d'éviter un troisième hiver de l'IA, qui ferait suite aux deux premiers connus pendant les années 1970 et 1990, au cours desquels la recherche et le développement de l'IA se sont quasiment arrêtés faute de budget et d'intérêt de la communauté. Ces cinq murs sont ceux de la confiance, de l'énergie, de la sécurité, de l'interaction avec les humains et de l'inhumanité. Ils contiennent chacun un certain nombre de ramifications et sont bien évidemment en interaction.

Ce texte se veut un outil de réflexion pour le lecteur, il est destiné à susciter des commentaires et réactions, que ce soit sur la réalité de ces murs, sur la complétude de mon analyse, ou sur la manière d'échapper à l'écrasement sur l'un de ces murs. Je précise cependant qu'il y a d'autres facteurs, non technologiques, qui mettent en cause l'avenir de l'IA et que je ne traite pas ici. Ainsi, par exemple, la pénurie de chercheurs, ingénieurs, techniciens capables de développer et de mettre en œuvre les technologies d'IA est très bien identifiée, elle se matérialise par les salaires élevés qui sont versés à celles et ceux qui affichent l'IA comme spécialité, et à la mise en place de nombreux programmes de formation qui, à terme, devraient permettre de revenir à une situation normale en la matière, l'offre rejoignant la demande. Il ne manque pas non plus de démarches gouvernementales, collectives, associatives et autres pour réglementer et gouverner l'IA ² ; je n'aborderai pas ces aspects ici. Je recommande plutôt de s'intéresser aux travaux du Partenariat mondial sur l'intelligence artificielle (GPAI, *Global Partnership on Artificial Intelligence*, en anglais) qui rassemble nombre d'experts de disciplines, d'origines et de cultures différentes sur les sujets de société gravitant autour de l'IA.

Je reconnais également qu'il y a des avis différents à ce sujet. Le rapport d'étape 2021 de l'étude longitudinale sur 100 ans de Stanford ³ examine les avancées de l'IA à ce jour et présente des défis pour le futur, très complémentaires de ceux que j'aborde ici. L'ouvrage *Human Compatible* ⁴ de Stuart Russell, professeur à Berkeley et auteur du principal livre de cours sur l'IA depuis deux décen-

2. Notamment la proposition européenne en faveur d'un *Artificial Intelligence (AI) Act*, dont la version initiale a été publiée en avril 2021, et sa contrepartie *AI Liability Directive* de fin 2022, ou encore la proposition américaine pour un *AI Bill of Rights*, datant également de fin 2022.

3. LITTMAN Michael L. et alii, *Gathering Strength, Gathering Storms: The One Hundred Year Study on Artificial Intelligence (AI100) 2021 Study Panel Report*, Stanford University, septembre 2021. URL : https://ai100.stanford.edu/sites/g/files/sbiybj18871/files/media/file/AI100Report_MT_10.pdf. Consulté le 25 janvier 2023.

4. RUSSELL Stuart J., *Human Compatible: Artificial Intelligence and the Problem of Control*, New York : Viking, 2019.

nies, s'intéresse à la compatibilité entre machines et humains, sujet que je traite différemment quand je parle du mur de l'interaction.

La confiance

Si les personnes n'ont pas confiance envers les systèmes d'IA avec lesquels elles interagissent, elles les rejeteront. Il y a largement de quoi causer un troisième hiver de l'IA ! La confiance est une notion riche et multifactorielle : beaucoup de sociologues et de technologues se sont intéressés aux mécanismes de son établissement. Plusieurs organismes tentent de fournir des définitions de ce qu'est la confiance envers les systèmes d'intelligence artificielle ; ceci a été le sujet principal du groupe d'experts mobilisés par la Commission européenne (dont tous les travaux se font dans l'optique « *trustworthy AI* », c'est-à-dire d'une IA digne de confiance ⁵).

Je résumerai ici en disant que la confiance, en particulier envers les artefacts numériques dont l'IA fait partie, est une combinaison de facteurs technologiques et sociologiques. Technologiques, comme la capacité de vérifier la justesse d'une conclusion, la robustesse à des perturbations, le traitement de l'incertitude, etc. Sociologiques, comme la validation par des pairs, la réputation dans les réseaux sociaux, l'attribution d'un label par un tiers de confiance, etc. Les questions d'interaction avec les utilisateurs sont intermédiaires entre ces deux types de facteurs : transparence, explicabilité, qualité des interactions de manière plus générale.

Les facteurs sociologiques ne sont pas propres à l'IA : dans un réseau de confiance entre humains, la transmission de la confiance ne fait pas nécessairement appel aux facteurs technologiques. En revanche, la base technologique de la confiance en l'IA est bien spécifique et pose de nombreux défis : on ne sait pas bien, aujourd'hui, prouver que les conclusions d'un système entraîné par apprentissage sur une base de données sont les bonnes, qu'elles sont robustes à des petites variations, qu'elles ne sont pas entachées de biais, etc. Il existe de nombreux programmes de R&D à ce sujet, dont un des plus importants est l'initiative *Confiance.ai* ⁶, centrée

5. « Ethics Guidelines for Trustworthy AI » ; « Assessment List for Trustworthy Artificial Intelligence (ALTAI) for Self-assessment » Commission européenne, respectivement 8 avril 2019. URL : <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/ethics-guidelines-trustworthy-ai> ; et 17 juillet 2020. URL : <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/assessment-list-trustworthy-artificial-intelligence-altai-self-assessment>. Consultés le 27 janvier 2023.

6. Site Internet <http://www.confiance.ai/>. Voir le livre blanc *Towards the Engineering of Trustworthy AI Applications for Critical Systems: The Confidence.ai Program*, octobre 2022. URL : <https://www.confiance.ai/>

sur les systèmes stratégiques (transport, défense, énergie, industrie) et portée par de grands groupes industriels dans le cadre du Grand Défi sur la fiabilisation et la certification de l'IA.

Tant que cette question restera ouverte, le risque pour l'IA de se heurter au mur de la confiance sera majeur. Il le sera encore plus pour les systèmes à risques (au sens de la Commission européenne dans sa proposition de réglementation de l'IA ⁷).

Le mur de l'énergie

Les chercheurs de l'université de Stanford publient annuellement l'édition de l'*AI Index*, qui mesure la progression des technologies d'IA dans le monde. L'édition de fin 2019 présentait pour la première fois l'évolution des besoins de calcul des applications de l'IA qui ont suivi la loi de Moore (doublement tous les 18 mois) de 1960 à 2012. Depuis, ces besoins doublent tous les trois mois et demi ! La demande du plus gros système d'IA connu à l'époque (et qui a donc doublé plusieurs fois depuis) était de 1 860 pétaFLOPS*jours (un pétaFLOPS pendant un jour) ⁸, soit plus de deux mois de calcul s'il utilisait la totalité de la machine Jean Zay (supercalculateur pour l'IA et le calcul scientifique mis à disposition des chercheurs français et européens depuis 2020), et une consommation électrique de près de trois gigawattheures. Pis encore, si le rythme actuel se poursuit, la demande sera encore multipliée par un facteur 1 000 dans trois ans, et un million dans six ans !

Le mur de l'énergie est bien identifié par certains chercheurs en apprentissage profond. L'article fondateur d'Emma Strubell *et alii* ⁹ établissait que l'entraînement d'un grand réseau de neurones de traitement de la langue naturelle de type « *transformer* », avec optimisation de l'architecture du réseau, consommait autant d'énergie que cinq voitures particulières pendant toute leur durée de vie (tableau 1).

[ai/wp-content/uploads/2022/10/LivreBlanc-Confiance.ai-Octobre2022.pdf](#). Consulté le 27 janvier 2023.

7. « Règlement du Parlement européen et du Conseil établissant des règles harmonisées concernant l'intelligence artificielle (législation sur l'intelligence artificielle) et modifiant certains actes législatifs de l'Union », Commission européenne, COM(2021) 206 final, 21 avril 2021. URL : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021PC0206&from=EN>. Consulté le 27 janvier 2023.

8. FLOPS : *F*loating-*p*oint *O*perations *P*er *S*econd / opérations en virgule flottante par seconde. Péta-FLOPS = 10¹⁵ FLOPS.

9. STRUBELL Emma, GANESH Ananya et MCCALLUM Andrew, « Energy and Policy Considerations for Deep Learning in NLP », ArXiv, Cornell University, juin 2019. URL : <https://arxiv.org/pdf/1906.02243.pdf>. Consulté le 27 janvier 2023.

Tableau 1. Estimation des émissions de CO₂ issues de l'entraînement d'un modèle courant d'IA de traitement du langage naturel (NLP), comparées à celles d'autres consommations familières (en livres* d'équivalent CO₂)

Vol New York-San Francisco, 1 passager	1 984
Une année de vie humaine (moyenne)	11 023
Une année de vie humaine d'un Américain (moyenne)	36 156
Véhicule particulier à moteur thermique, sur toute sa durée de vie	126 000
Modèle d'entraînement NLP - pipeline (analyse, SRL**)	39
<i>Avec réglage et expérimentation</i>	78 468
Gros modèle d'entraînement Transformer	192
<i>Avec optimisation de l'architecture du réseau neuronal</i>	626 155

*Une livre équivaut à 453,6 grammes.

***Safe Reinforcement Learning* (apprentissage par renforcement).

Source : STRUBELL Emma, GANESH Ananya et MCCALLUM Andrew, *op. cit.*

L'article de Neil Thompson *et alii*¹⁰ allait plus loin en concluant que « les limites de calcul de l'apprentissage profond seront bientôt contraignantes pour toute une série d'applications, ce qui rendra impossible l'atteinte d'importantes étapes de référence si les trajectoires actuelles se maintiennent ». Et ceci est souligné par les chiffres donnés par l'*AI Index* qui insiste sur le facteur exponentiel correspondant. Fin 2021, Neil Thomson *et alii* ont complété cette analyse¹¹ sur l'exemple du traitement d'images (ImageNet) et abouti à estimer à 9 ce facteur entre la réduction du taux d'erreur et le besoin en calcul et données, ce qui signifie qu'une division par 2 du taux d'erreur nécessite 500 fois plus de calcul, et une division par 4 demanderait 250 000 fois plus.

Le mur de la consommation énergétique liée aux besoins de calcul intensif des applications de l'IA, qui sont basées sur l'apprentissage profond et consommatrices de très grandes quantités de données, en arrêtera inévitablement la croissance exponentielle, à terme relativement rapproché, si l'on ne fait rien pour y remédier.

10. THOMPSON Neil C. *et alii*, « The Computational Limits of Deep Learning », ArXiv, Cornell University, juillet 2020, mis à jour en juillet 2022. URL : <https://arxiv.org/pdf/2007.05558.pdf>. Consulté le 27 janvier 2023.

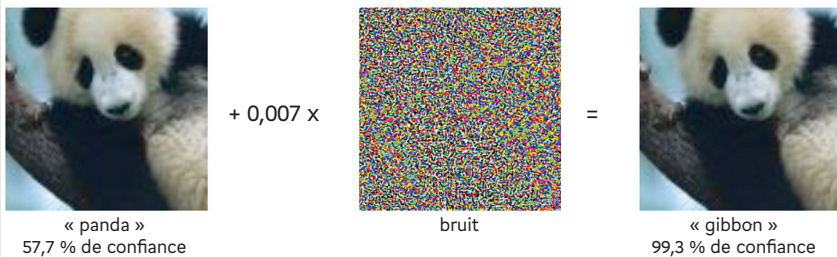
11. THOMPSON Neil C. *et alii*, « Deep Learning's Diminishing Returns: The Cost of Improvement Is Becoming Unsustainable », *IEEE Spectrum*, 24 septembre 2021. URL : <https://spectrum.ieee.org/deep-learning-computational-cost>. Consulté le 27 janvier 2023.

Le mur de la sécurité

Les questions de sécurité des systèmes d'information ne sont pas propres à l'IA, mais les systèmes d'IA ont certaines particularités qui les rendent sensibles à des problèmes de sécurité d'un autre genre, et tout aussi importants. Si les systèmes d'IA sont, comme tous les systèmes numériques, susceptibles d'être attaqués, piratés, compromis par des méthodes « usuelles » (intrusion, déchiffrement, virus, saturation, etc.), ils possèdent des caractéristiques particulières qui les rendent particulièrement fragiles à d'autres types d'attaques plus spécifiques. Les attaques antagonistes ou adverses (*adversarial attacks* en anglais) consistent à injecter des variations mineures des données d'entrée, lors de la phase d'inférence, afin de modifier de manière significative la sortie du système. Les premières références d'attaques adverses sont le célèbre exemple du panneau STOP non reconnu lorsqu'il est tagué par des étiquettes, et celui du panda confondu avec un gibbon suite à l'ajout d'une faible composante de bruit (voir illustrations ci-dessous) ; on sait qu'il est assez facile de composer une attaque destinée à modifier très fortement l'interprétation des données faite par un réseau de neurones. Et cela ne concerne pas que les images : on peut concevoir des attaques antagonistes sur du signal temporel (audio en particulier), sur



Exemple de génération rapide d'illustrations contradictoires



Lecture : l'IA du moteur de recherche GoogleNet identifie un panda avec 57,7 % de confiance sur la première image. L'ajout d'un « bruit » quasi imperceptible (0,007) modifie le résultat : c'est un gibbon qui est identifié avec 99,3 % de confiance.

Source : GOODFELLOW Ian J., SHLENS Jonathon et SZEGEDY Christian, « Explaining and Harnessing Adversarial Examples », ArXiv, Cornell University, décembre 2014. URL : <https://arxiv.org/pdf/1412.6572.pdf>. Consulté le 31 janvier 2023.

du texte, etc. Les conséquences d'une telle attaque peuvent être dramatiques, une mauvaise interprétation des données d'entrée peut conduire à une prise de décision dans le mauvais sens (par exemple, accélérer au lieu de s'arrêter, pour une voiture). Le rapport du NIST sur le sujet ¹² établit une intéressante taxonomie des attaques et défenses correspondantes. Il montre notamment que les attaques en phase d'inférence ne sont pas les seules qui font souci. Il est notamment possible de polluer les bases d'apprentissage avec des exemples antagonistes, ce qui compromet naturellement les systèmes entraînés à partir de ces bases. Bien évidemment, la communauté de recherche en intelligence artificielle s'est saisie de la question et les travaux sur la détection des attaques antagonistes sont nombreux.

Toujours est-il que des accidents — aujourd'hui inévitables — sur des systèmes à risques ou stratégiques, causés par ces questions de sécurité, auront des conséquences extrêmement néfastes sur le développement de l'intelligence artificielle.

Un deuxième point d'attention est la question du respect de la vie privée. Cette question prend une dimension particulière avec les systèmes d'IA qui ont une grande capacité à révéler des données confidentielles de manière non désirée : par exemple retrouver les images individuelles d'une base d'entraînement dans les paramètres d'un réseau de neurones, ou opérer des recoupements sur diverses sources pour en déduire des informations sur une personne. Ces questions sont notamment à l'origine des travaux en apprentissage réparti (*federated learning*) ¹³ dont le but est de réaliser un apprentissage global à partir de sources multiples réparties sur le réseau pour composer un modèle unique contenant, d'une certaine manière, une compression de toutes les données réparties mais sans pouvoir en retrouver l'origine.

Pour approfondir le sujet de la cybersécurité de l'apprentissage machine, une bonne référence est le rapport de l'agence européenne de sécurité informatique (ENISA) sur le sujet ¹⁴. Si l'on y ajoute les

12. TABASSI Elham *et alii*, « A Taxonomy and Terminology of Adversarial Machine Learning », Draft NISTIR (National Institute of Standards and Technology - *Internal Report*), n° 8269, octobre 2019. URL : <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2019/NIST.IR.8269-draft.pdf>. Consulté le 27 janvier 2023.

13. KAIROUZET Peter *et alii*, « Advances and Open Problems in Federated Learning », ArXiv, Cornell University, décembre 2019 (mis à jour en mars 2021). URL : <https://arxiv.org/abs/1912.04977>. Consulté le 27 janvier 2023.

14. ENISA (European Union Agency for Cybersecurity), *Securing Machine Learning Algorithms*, ENISA, décembre 2021. URL : <https://www.enisa.europa.eu/publications/securing-machine-learning-algorithms/@download/fullReport>. Consulté le 27 janvier 2023.

questions de sécurité habituelles, ainsi que les problèmes multiples causés par les *deep fakes*, ces fausses images ou vidéos très facilement créées grâce à la technologie des réseaux génératifs antagonistes (GAN, *Generative Adversarial Networks*), il est clair que le mur de la sécurité de l'IA est aujourd'hui suffisamment solide et proche pour qu'il soit essentiel de s'en protéger.

Le mur de l'interaction avec les humains

De très nombreux systèmes d'intelligence artificielle doivent interagir avec les humains. C'est le cas de certains robots, notamment, et on pense en particulier aux véhicules autonomes ; mais aussi les robots d'assistance aux personnes, les dialogueurs (*chatbots*) et plus généralement tous les systèmes qui ont besoin de communiquer avec leurs utilisateurs.

Les machines intelligentes d'aujourd'hui sont essentiellement des outils, pas des coéquipières. Au mieux, ces technologies sont utiles dans la mesure où elles étendent les capacités humaines, mais leurs compétences communicatives et cognitives sont encore inadéquates pour en faire des coéquipières utiles et de confiance. En effet, les machines collaboratives intelligentes doivent être flexibles et s'adapter aux états du coéquipier humain, ainsi qu'à l'environnement. Elles doivent comprendre les capacités et les intentions de l'utilisateur, et s'y adapter.

Or, nous ne comprenons pas suffisamment la cognition, la motivation et le comportement social de haut niveau de l'être humain social. Même si d'importants efforts de recherche en sciences cognitives ont été consacrés à la compréhension de la façon dont les humains pensent, apprennent et agissent, dans les environnements naturels, la séquence d'actions qui mène à un objectif n'est pas explicitement indiquée, voire la connaissance même des objectifs d'un humain reste complexe à appréhender. Stuart Russell a consacré un excellent ouvrage à ce sujet ¹⁵, dans lequel il montre à quel point il est difficile pour un système d'IA de connaître les intentions d'un humain ou d'un groupe d'humains, et il propose que l'IA questionne systématiquement lorsqu'il y a ambiguïté.

Réciproquement, il est également indispensable de permettre aux collaborateurs humains de comprendre les buts et actions des machines avec lesquelles ils sont en interaction. Les machines

15. RUSSELL Stuart J., *op. cit.*

ont souvent des caractéristiques physiques et des capacités très différentes de celles des humains, ce qui a un impact sur les rôles qu'elles peuvent jouer dans une équipe. Dans ce contexte, les besoins d'explications (que l'on nomme souvent « explicabilité ») de la part des systèmes d'intelligence artificielles sont cruciaux — ils font d'ailleurs l'objet d'une des mesures de la réglementation proposée par la Commission européenne (déjà citée). Mais les capacités d'explication des systèmes actuels d'IA sont très limitées, particulièrement lorsqu'il s'agit de réseaux neuronaux profonds dont les modèles internes sont composés de très grandes matrices de poids qu'il est difficile d'interpréter. J'en veux pour preuve les innombrables recherches sur l'explicabilité de l'IA, initialement popularisées par le programme « XAI » de la DARPA américaine lancé en 2017 ¹⁶.

Un problème plus général, illustré par le cas des véhicules autonomes ¹⁷, est celui du transfert du contrôle lorsque la machine reconnaît être dépassée (par exemple en cas de panne, de manque de visibilité, etc.) et doit transférer le contrôle à un humain, qui a besoin de beaucoup de temps pour assimiler le contexte et pouvoir reprendre la main. En résumé, l'interaction avec les humains est un sujet complexe et non résolu aujourd'hui, et il ne le sera pas de manière générale, mais plutôt application par application, comme dans l'exemple précédent.

Le mur de l'inhumanité

Je range plusieurs composantes dans ce cinquième mur que j'appelle globalement celui de l'humanité des machines, ou plutôt celui de leur inhumanité : acquisition du sens commun ; raisonnement causal ; passage au système 2 (au sens de Daniel Kahneman ¹⁸). Toutes composantes que nous, humains, possédons naturellement et que les systèmes d'intelligence artificielle n'ont pas — et n'auront pas à court ou moyen terme.

16. TUREK Matt, « Explainable Artificial Intelligence (XAI) », DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency). URL : <https://www.darpa.mil/program/explainable-artificial-intelligence>. Consulté le 27 janvier 2023.

17. Dans la classification des niveaux d'autonomie pour le véhicule autonome, le niveau maximum 5 est celui de l'autonomie complète. Au niveau juste inférieur, 4, le véhicule gère presque toutes les situations mais rend la main dans des situations exceptionnelles, ce qui est extrêmement délicat à mettre en œuvre.

18. C'est-à-dire le mode de pensée réfléchi propre aux tâches complexes ou à la prise de décisions importantes (voir plus loin). Cf. KAHNEMAN Daniel, *Thinking, Fast and Slow*, New York : Farrar, Straus and Giroux, 2011, 512 p. (traduction française : *Système 1 / système 2. Les deux vitesses de la pensée*, Paris : Flammarion, 2012).

Le sens commun, c'est ce qui nous permet de vivre au quotidien. Nous savons qu'il ne faut pas mettre les doigts dans une prise électrique, mais une Alexa a récemment conseillé à une fillette de 10 ans de le faire. Dans les années 1980-1990, un grand projet de modélisation des connaissances, Cyc ¹⁹, a tenté de développer une base de connaissances du sens commun, en stockant des millions de faits et règles élémentaires sur le monde. Ce projet n'a pas abouti, les systèmes d'IA actuels ne sont capables que de résoudre des problèmes très précis dans un contexte limité, ils ne savent pas sortir de leur domaine de compétence ²⁰. Sans aller jusqu'à parler d'intelligence artificielle générale (celle qui fait peur et qu'aucun spécialiste du domaine n'envisage réellement à un horizon atteignable), faute de disposer de bases élémentaires faisant sens, les systèmes d'IA seront toujours susceptibles de commettre des erreurs monumentales aux conséquences potentielles dommageables.

Il est très largement connu que les systèmes d'IA entraînés par apprentissage établissent des corrélations entre variables sans se soucier de causalité. Dans l'exemple référence du classement d'images de chats, le réseau établit une corrélation — complexe certes — sans lien de causalité entre les données d'entrée (les pixels de l'image) et la donnée de sortie (la catégorie). Il existe de nombreux exemples de corrélations « fallacieuses » (*spurious correlations*) comme celui illustré par le graphique 1, tiré du site du même nom ²¹, qui établit une corrélation à 79 % entre le nombre de lancements de navettes spatiales et celui de doctorants en sociologie. Autrement dit, un système d'IA entraîné par apprentissage sera capable de reproduire cette relation et de prédire très correctement l'un à partir de l'autre. De même, on doit pouvoir décider si un jour est pluvieux à partir des ventes de parapluies, mais la causalité est évidemment dans l'autre sens. L'absence de prise en compte de la causalité dans les systèmes d'IA est une grande faiblesse : globalement, les systèmes d'apprentissage automatique se basent sur le passé pour faire des prédictions sur le futur, faisant implicitement l'hypothèse que la structure causale du système ne changera pas.

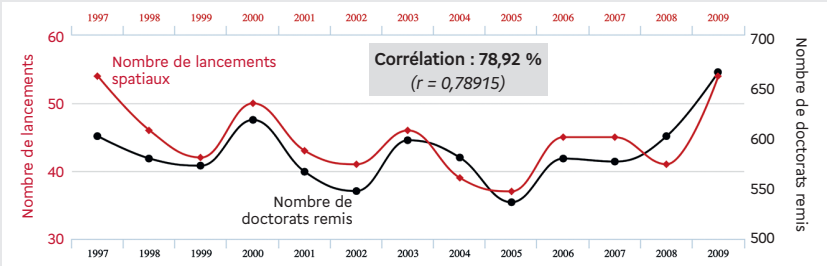
Il y a principalement deux manières de prendre en compte la causalité dans un système d'apprentissage automatique : le faire en

19. Présenté sur la page Wikipedia <https://en.wikipedia.org/wiki/Cyc>

20. Notons toutefois le développement récent de quelques systèmes multitâches, comme Gato de Google DeepMind, dont le seul réseau de neurones de 1,2 milliard de paramètres est capable de traiter (mal) des centaines de tâches différentes.

21. Site Internet <https://tylervigen.com/spurious-correlations>

Graphique 1. Corrélation (fallacieuse) entre les lancements spatiaux non commerciaux dans le monde et le nombre de doctorats de sociologie remis aux États-Unis



Source des données : Administration fédérale américaine et National Science Foundation. Graphique issu du site Internet <https://tylervigen.com/spurious-correlations>. Consulté le 31 janvier 2023.

injectant manuellement des connaissances sur le domaine d'intérêt, ou faire découvrir les liaisons causales à partir de données d'apprentissage²². Mais c'est très difficile : dans le premier cas, on revient aux problèmes des systèmes experts, avec les questions de cohérence des connaissances, de l'effort nécessaire pour les acquérir, etc. ; dans le deuxième cas, on ne sait traiter aujourd'hui que des exemples liés à très peu de variables. Si l'on ajoute les phénomènes de *feedback*, forcément présents dans les systèmes complexes, matérialisés par des boucles causales avec un contenu temporel, on ne sait plus le faire du tout.

Enfin, la troisième composante du mur de l'inhumanité est le passage au niveau du système 2. La très grande majorité des applications de l'IA consiste à (très bien) traiter un signal en entrée et à produire une réponse quasiment instantanée : reconnaissance d'objets ou de personnes dans des images et des vidéos, reconnaissance de la parole, etc. Dans son livre *Thinking, Fast and Slow*²³, Daniel Kahneman s'appuie sur des travaux en psychologie qui schématisent le fonctionnement de notre cerveau de deux manières différentes, qu'il nomme « système 1 » et « système 2 ». Système 1 est le mode rapide, proche de la perception : il ne vous faut qu'un instant pour reconnaître une émotion sur une photo, pour comprendre un mot ou une courte phrase. En revanche, si vous devez faire une multiplication compliquée et si vous n'êtes pas un calculateur prodige, vous devrez faire appel à du raisonnement

22. Une solution hybride étant de spécifier « manuellement » un graphe causal concis et de faire apprendre ses paramètres à partir de données.

23. *Op. cit.*

pour donner le résultat. Les processus mentaux plus lents sont de la responsabilité du système 2. Et les deux modes sont en permanente interaction, le système 1 fournit les éléments prétraités au système 2 qui peut conduire ses raisonnements dessus.

Cette théorie commence à inspirer les chercheurs en intelligence artificielle : aujourd'hui, avec l'apprentissage machine profond, l'IA est au niveau du système 1. Pour pouvoir dépasser cela, représenter les connaissances de sens commun, faire de la planification, des raisonnements élaborés, il faudra coder le système 2, et il faudra aussi coder l'interaction continue entre le système 1 et le système 2. Ce sont de beaux sujets de recherche pour les prochaines années, mais pour l'instant, un idéal encore bien lointain, même si de premiers exemples ont été réalisés comme l'a montré Francesca Rossi d'IBM lors de la conférence AAAI (Association for the Advancement of Artificial Intelligence)-2022 ²⁴.

Il y a d'autres facteurs d'inhumanité dans l'IA — par exemple, la question de l'émotion, de l'empathie, ou encore la réalisation de l'intelligence collective, sujets intéressants que je ne développe pas ici, considérant que les trois premiers constituent déjà un mur très solide sur lequel l'IA va inévitablement buter dans les prochaines années.

Des pistes pour éviter de se fracasser sur les cinq murs

► **D'abord, sur la confiance.** C'est un des sujets majeurs de recherche et développement en IA depuis quelques années, pour les systèmes dits à risques ou stratégiques ²⁵. On peut donc espérer avoir dans quelques années un ensemble de technologies permettant d'améliorer la confiance des utilisateurs envers les systèmes d'IA. Cela suffira-t-il ? Pour ma part, je pense que faute d'avancées fondamentales sur la nature des systèmes d'IA, on n'arrivera pas à des garanties suffisantes pour donner une confiance totale ; et probablement des accidents, catastrophiques ou non, continueront à se produire. En attendant d'avoir la possibilité de démontrer les facteurs de confiance, il faudra s'appuyer sur des quantités d'expériences : des centaines de millions de kilomètres parcourus sans

24. GANAPINI Marianna B. *et alii*, « Combining Fast and Slow Thinking for Human-like and Efficient Navigation in Constrained Environments », ArXiv, Cornell University, janvier 2022. URL : <https://arxiv.org/abs/2201.07050>. Consulté le 31 janvier 2023.

25. Pour des applications non stratégiques comme la recommandation de contenu ou de chemin optimal pour aller d'un point à un autre, cette question est évidemment moins cruciale. Nous utilisons ces systèmes tous les jours sans nous poser de questions.

encombre par des véhicules autonomes, des dizaines de milliers de décisions automatiques d'attribution de crédits non contestées, de diagnostics médicaux jugés corrects par des spécialistes, etc.). Et la confiance n'est pas qu'un sujet technologique, les facteurs humains et sociaux sont prépondérants.

► **Sur l'énergie**, plusieurs pistes sont développées, car le mur est proche de nous ! Si la croissance actuelle se poursuit, il faudra en 2029 un million de fois plus d'énergie qu'aujourd'hui pour entraîner les systèmes d'IA, à supposer que l'on continue à le faire de la même manière.

Je vois principalement trois types de solutions, dont les performances sont très différentes : a) des solutions matérielles ; b) l'amélioration des architectures et algorithmes de réseaux neuronaux profonds ; c) l'hybridation avec d'autres formalismes d'IA. Je ne m'étends pas sur a) : il existe des dizaines de développements de nouveaux processeurs, architectures 3D, architectures neuro-inspirées, massivement parallèles, etc., et d'aucuns disent que l'ordinateur quantique lorsqu'il existera, résoudra la question.

Les recherches sur b) sont plus intéressantes : améliorer la structure des réseaux, par exemple en les rendant parcimonieux par la destruction de tous les neurones et connexions qui ne sont pas indispensables ; ou encore par la définition d'architectures spécifiques, à l'image des *transformers* (BERT [Bidirectional Encoder Representations from Transformers], Meena, GPT3 [Generative Pre-trained Transformer 3], etc.) pour le langage, dont la structure permet de faire de l'autosupervision et donc au moins d'économiser l'annotation des données d'entraînement²⁶. Je pense également à l'amélioration du fonctionnement interne des réseaux, comme l'ont proposé divers auteurs avec des alternatives à la rétropropagation du gradient²⁷ ou autres.

Enfin, la troisième approche consiste à combiner les modèles neuronaux à d'autres types de modèles, essentiellement de deux natures : modèles numériques utilisés pour la simulation, l'optimisation et le contrôle de systèmes ; modèles symboliques, à base de connaissances. Si on est capable de combiner l'expertise contenue dans ces modèles, basée sur la connaissance établie au cours des

26. VASWANI Ashish *et alii*, « Attention Is All You Need », ArXiv, Cornell University, juin 2017. URL : <https://arxiv.org/abs/1706.03762>. Consulté le 31 janvier 2023.

27. Méthode d'apprentissage machine consistant, pour entraîner un réseau de neurones, à mettre à jour les poids de chaque neurone de la dernière couche vers la première (NDLR).

années par les meilleurs spécialistes humains, à celle contenue dans les données et que l'on pérennise par apprentissage, on doit pouvoir faire des économies substantielles de calcul, chacune des deux approches bénéficiant de l'autre. Le sujet est difficile car les modèles basés sur les données et ceux basés sur les connaissances ne sont pas compatibles entre eux, *a priori*.

► J'ai bien peur que le mur de la **sécurité** de l'IA soit très solide. Ou plutôt, il a une tendance naturelle à s'autoréparer lorsqu'il est percé. Je m'explique. De nouvelles failles des systèmes sont révélées chaque semaine ; des attaques contre des sites ou des systèmes stratégiques ont lieu en continu, qu'elles proviennent d'États mal intentionnés, de groupes terroristes ou mafieux... Les fournisseurs proposent régulièrement des mises à jour des systèmes d'exploitation et applications pour intégrer de nouvelles protections ou corrections de failles. En la matière, il s'agit toujours d'un jeu d'attaque et de défense. Les pirates conçoivent des attaques de plus en plus sophistiquées, l'industrie répond par des défenses encore plus sophistiquées. Les générateurs d'attaques antagonistes et de *deep fakes* produisent des attaques de plus en plus sournoises et des faux de plus en plus crédibles, l'industrie répond en augmentant la performance des détecteurs de faux. Les protocoles de chiffrement connaissent une augmentation périodique de la longueur des clefs de cryptographie, qui seront ensuite cassées par des algorithmes de plus en plus gourmands en ressources de calcul. Et ainsi de suite.

Pour les attaques adverses, une solution déjà évoquée est d'entraîner les réseaux avec de telles attaques, ce qui les rend plus robustes aux attaques connues. Mais, la course continuant, les types d'attaques continueront d'évoluer et il faudra, comme toujours, répondre avec un temps de retard.

Comparons au domaine militaire, qui a connu la course aux armements pendant de longues périodes : glaives, boucliers et armures il y a des milliers d'années, missiles et antimissiles aujourd'hui. La théorie de la dissuasion nucléaire a modéré cette course, puisque la réponse potentielle d'une puissance attaquée ferait subir des dommages si graves que cela ôterait toute envie d'attaquer. Il faudrait peut-être imaginer une doctrine équivalente à la dissuasion nucléaire en matière de cybersécurité de l'IA — ou espérer que l'IA apporte suffisamment de bonheur à la population mondiale pour que les causes sociales et autres (politiques, religieuses, économiques, etc.) de la malveillance disparaissent. Cela va prendre un peu de temps.

► J'aborde maintenant le mur de l'**interaction avec les humains**.

On peut commencer à le fracturer en ajoutant des capacités d'explication associées à la transparence des algorithmes utilisés. La transparence est indispensable lorsqu'il s'agit de systèmes qui sont susceptibles de prendre des décisions (imposées) ayant un impact important sur notre vie personnelle et sociale.

J'ai déjà abordé, dans la section correspondante, les travaux sur l'explicabilité. Les pistes sont nombreuses, je ne les détaillerai pas plus ici. Ma faveur va à celles qui combinent apprentissage numérique et représentations à base de connaissances (logiques, symboliques, ontologiques), même si elles sont encore à l'état de promesses : le passage du numérique (massivement distribué dans des matrices de poids) au symbolique est un sujet particulièrement ardu et non résolu de manière satisfaisante pour le moment.

Plus généralement, l'interaction entre systèmes d'IA et humains entre dans le concept général d'interaction humain-machine (HCI, *Human-Computer Interaction* en anglais). La communauté HCI travaille depuis des décennies sur le sujet général, avec des réalisations remarquables en visualisation, réalité virtuelle, réalité augmentée, interfaces haptiques²⁸, etc. ; on peut — et il faut — faire appel à leurs compétences pour le cas particulier des interactions avec des machines d'IA. La piste que je préconise donc (à l'image d'autres chercheurs et institutions qui l'ont également encouragée) est de resserrer les liens entre les deux communautés IA et HCI. Les chercheurs en IA y trouveront des éléments pour repousser le quatrième mur, et les chercheurs en HCI y trouveront la source de nouveaux défis pour leurs méthodes et leurs outils.

► Reste le mur de l'**inhumanité** : le plus éloigné, mais aussi le plus solide pour le moment. Le risque n'est pas encore très important mais s'amplifiera au fur et à mesure de l'insertion de systèmes IA de plus en plus autonomes, intrusifs et « impactants », dans notre société. En ce qui concerne la quête du sens commun, on a vu que des millions de dollars et des années de recherche investis sur Cyc n'ont pas réglé la question, loin de là. Peut-on miser sur de nouvelles architectures et organisations de réseaux neuronaux pour cela ? Certains l'espèrent. Personnellement, je miserai plutôt sur une autre branche de l'IA, celle de la robotique développementale (*developmental robotics*), qui a pour but de faire acquérir à des robots

28. Qui permettent de simuler des sensations tactiles à l'utilisateur qui manipule un objet virtuel (NDLR).

doués de sens les notions de base du monde, en interagissant avec leur environnement — peuplé d'objets et d'humains — et surtout en stimulant ce qu'on appelle la curiosité artificielle, à savoir doter les robots d'intentions et de capacités d'exploration et d'envoi de *stimuli* vers leur environnement afin d'en recevoir un *feedback* pour l'apprentissage par renforcement. Certaines expérimentations (photo ci-contre) faites par l'équipe INRIA (Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique)-FLOWERS (FLOWing Epigenetic Robots and Systems) sont assez convaincantes en ce sens.

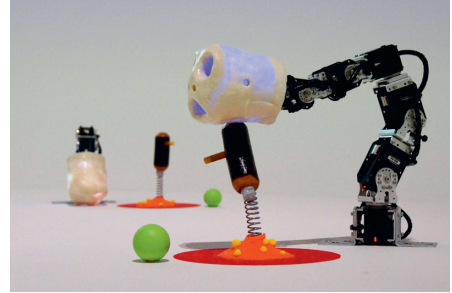


Photo issue de l'installation Ergo-Robots/FLOWERS Fields. Accessible sur le site du laboratoire FLOWERS. URL : <https://flowers.inria.fr/robots/ergo-robots-fr/>. Consulté le 31 janvier 2023.

J'ai déjà abordé les recherches en cours sur la découverte de la causalité par apprentissage automatique. C'est un sujet de longue haleine bien identifié mais disposant de peu de résultats. Je pense que l'introduction explicite de causalité, soit par conception d'architecture, soit par ajout d'une couche causale symbolique, apportera des résultats plus rapidement et plus concrètement — modulo la difficulté de combiner symbolique et numérique, dont j'ai déjà parlé.

Enfin, pour le passage de l'IA au niveau du système 2, j'ai abordé les pistes dans la section correspondante. La principale question est de savoir si cela peut être atteint par apprentissage de réseaux neuronaux — après tout, c'est bien ainsi que nous fonctionnons — ou par la conjonction de réseaux avec d'autres modes de représentation des connaissances, réalisant une IA hybride conjuguant symbolique et numérique, mettant en résonance les rêves et avancées de l'IA de la fin du XX^e siècle avec les progrès remarquables de celle du début du XXI^e.

Et tout ceci serait mobilisé pour réaliser des IA faibles, spécialisées dans la résolution d'un seul ou d'un petit nombre de problèmes, bien entendu, même si certains comme DeepMind ont l'ambition de développer une IA générale. Mais essayons déjà de ne pas nous écraser dans les murs de l'IA spécialisée. ■

À PROPOS DE CHATGPT

ChatGPT, sorti le 30 novembre 2022, est déjà devenu une idole, le nombre de personnes qui le consultent est tel que, dès à présent, il faut s'inscrire et attendre son tour pour dialoguer avec lui (ou elle). Dernier né parmi les OpenAI (entreprise financée par Microsoft), son succès repose sur plusieurs de ses caractéristiques : d'abord parce qu'il est doté d'une interface vocale, donc capable de répondre en langage naturel aux questions qu'on lui pose ; ensuite parce qu'il fonctionne grâce à un corpus très important de mots et de phrases disponibles sur Internet jusqu'à la mi-2021, qui lui permet de fournir des réponses souvent exactes à de très nombreuses questions, *a fortiori* de produire des articles (le test ayant été fait par de nombreux journalistes), voire des textes en apparence scientifiques. D'où d'ailleurs le danger qu'il présente de devenir, pour les élèves et étudiants, un substitut à leurs devoirs, voire d'être exploité abusivement pour produire des articles scientifiques. Mais, attention ! Il peut aussi commettre des erreurs, et même avoir des hallucinations et inventer de toutes pièces certaines réponses. Certains estimeront peut-être que

cela le rend plus humain mais, si ses capacités de calcul le rendent particulièrement agile, il n'en reste pas moins qu'il ne s'agit que d'une intelligence artificielle.

Le texte de ce bref encadré a été soumis à ChatGPT, qui n'y a pas répondu. Il reste à nos lecteurs le soin d'en savoir plus sur cette innovation qui a été abondamment commentée début 2023 mais qui, quand paraîtra ce numéro de *Futuribles*, sera peut-être déjà dépassée... Des programmes informatiques de plus en plus élaborés sont en permanence mis au point. Ils permettent déjà de produire des traductions de qualité, d'écrire des poèmes, de faire des calculs à une vitesse sidérante, de susciter l'angoisse qu'ils remplacent prochainement des millions de travailleurs. En attendant, il semble que ces développements exigent d'expurger du *Web* un maximum de contenus violents ou discriminants, tâche qu'exécute une entreprise de sous-traitance au Kenya, dont « les étiqueteurs seraient payés entre 1,32 et 2 dollars US de l'heure » (selon le magazine *Time* cité par *Les Échos* du 21 janvier 2023). ■

Hugues de Jovenel

Interview : ChatGPT par ChatGPT

Depuis son lancement, l'agent conversationnel (*chatbot*) ChatGPT fait la une des médias et suscite les conversations. Beaucoup y voient une version très performante d'intelligence artificielle (IA) et l'annonce de nouvelles modalités d'accès au savoir et de créativité. Présenté comme pouvant générer du texte pour répondre aux requêtes les plus variées des internautes, et fournir ses réponses dans plusieurs langues dont le français, nous l'avons testé en l'interrogeant sur lui-même et sur les perspectives qu'il ouvre.

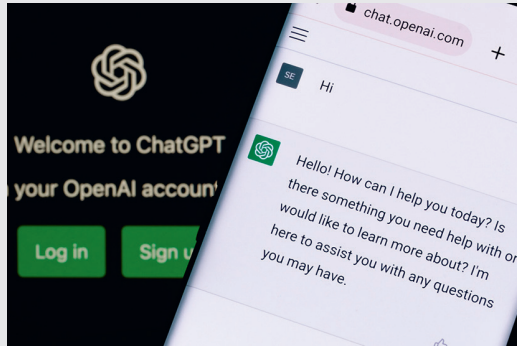
Pierre-Antoine Marti a mené l'interview pour Futuribles International. Le propos est retranscrit sans modifications : seules les plus grosses coquilles et erreurs grammaticales ont été corrigées, par égard pour nos lecteurs — il y en avait une dizaine. ■

ChatGPT, pourrais-tu expliquer ton fonctionnement ?

Je suis un modèle de langage entraîné par OpenAI. J'ai été formé à comprendre et à générer du texte en utilisant une grande quantité de données de textes provenant d'Internet. Mon but est de pouvoir comprendre les questions posées à moi et de fournir une réponse pertinente en utilisant les connaissances que j'ai apprises pendant mon processus d'entraînement.

Qu'apportes-tu au quotidien des gens ?

Je suis conçu pour aider les gens en leur fournissant des informations et des réponses à leurs questions. Je peux aider les gens à trouver des réponses à des questions factuelles, à comprendre des sujets complexes, à résoudre des problèmes et à effectuer des tâches. Je peux aider les entreprises à automatiser certaines tâches de service client, à améliorer les expériences utilisateur dans les applications, les *chatbots* et les assistants virtuels, à augmenter les ventes en ligne, à générer des contenus automatiquement, etc. En gros, je suis un outil puissant pour les gens pour effectuer des tâches de manière plus efficace et rapide.



© Ascannio / Shutterstock

Quels pourraient être les risques liés à ton utilisation ?

Il existe plusieurs risques liés à l'utilisation de modèles de traitement du langage comme moi. Certains de ces risques incluent :

- La propagation d'informations fausses ou trompeuses : si des informations erronées ou trompeuses sont présentes dans les données d'entraînement utilisées pour entraîner un modèle, il existe un risque que ces informations soient répercutées dans les réponses générées par le modèle.
- Les biais de données : les modèles de traitement du langage, comme moi, sont entraînés sur des données provenant d'Internet, qui peuvent contenir des biais sociaux et culturels. Ces biais peuvent être répercutés dans les réponses générées par le modèle.
- La violation de la vie privée : les modèles de traitement du langage peuvent être utilisés pour collecter des informations sensibles sur les utilisateurs, comme leur nom, leur adresse, leur numéro de téléphone, et ceci peut mener à la violation de leur vie privée.

- La dépendance : il est important de ne pas être trop dépendant des modèles automatisés, il est toujours important de vérifier et valider les réponses fournies par les modèles pour s'assurer de leur pertinence et de leur exactitude.

Il est important que les entreprises et les développeurs qui utilisent des modèles de traitement du langage comme moi prennent en compte ces risques et travaillent pour les minimiser en utilisant des données de qualité, en vérifiant les réponses générées par les modèles et en veillant à respecter la vie privée des utilisateurs.

Les modèles de traitement du langage comme moi seront-ils amenés à se développer à l'avenir, et comment ?

Les modèles de traitement du langage comme moi sont en effet en constante évolution et il est prévu qu'ils continuent à se développer à l'avenir. Il y a plusieurs raisons pour lesquelles cela se produit :

- Les données sont de plus en plus abondantes : avec la croissance d'Internet et l'augmentation de la quantité de contenu généré par les utilisateurs, il y a de plus en plus de données disponibles pour entraîner les modèles de traitement du langage.
- Les ordinateurs sont de plus en plus puissants : les progrès dans les technologies de calcul permettent d'entraîner des modèles de traitement du langage de plus en plus sophistiqués, avec des tailles de modèles plus importantes, plus de

couches, et des capacités de traitement plus élevées.

- L'IA est un domaine en constante évolution : les recherches en intelligence artificielle continuent à progresser, et ces avancées permettent de développer de nouvelles techniques pour améliorer les modèles de traitement du langage.

- L'augmentation de l'utilisation des modèles de traitement du langage : l'utilisation de modèles de traitement du langage dans divers domaines tels que le commerce électronique, la finance, les technologies de l'information, les services à la clientèle, etc., augmente et cela pousse à améliorer ces modèles pour répondre aux besoins spécifiques de ces domaines.

Pour ces différentes raisons, il est prévu que les modèles de traitement du langage deviennent de plus en plus précis, plus rapides et plus capables de générer des réponses plus naturelles et plus contextuelles. Les équipes de recherche continuent à travailler pour améliorer leur compréhension de la langue, de la thématique, de la logique, de la causalité, de la compréhension de l'émotion, etc. Et cela va continuer à améliorer l'expérience utilisateur dans les interactions avec des modèles de traitement de langue comme moi.

Est-il possible qu'advienne une « singularité technologique », si oui à quel horizon et avec quelles conséquences ?

La « singularité technologique » est une idée selon laquelle il y aurait un point à l'avenir où les progrès en

matière d'intelligence artificielle (IA) atteindraient un tel niveau que les machines seraient capables de s'autoaméliorer de manière exponentielle, dépassant rapidement les capacités humaines. Cette idée est souvent associée à l'écrivain et futuriste américain Vernor Vinge, qui a été l'un des premiers à utiliser le terme « singularité technologique » dans les années 1980.

Il est difficile de prévoir avec précision quand cela pourrait se produire, si cela se produit. Les experts sont partagés sur la question de savoir si cela se produira jamais, et si c'est le cas, quand cela pourrait se produire. Certains estiment qu'il pourrait se produire dans les prochaines décennies, tandis que d'autres estiment qu'il pourrait ne jamais se produire. Il y a également des avis selon lesquels, même si

l'IA atteint un certain niveau de puissance, il y aura des limites physiques et éthiques qui empêcheront une telle singularité technologique.

Les conséquences potentielles de la singularité technologique sont très débattues, mais elles pourraient être à la fois positives et négatives. Certaines personnes estiment que cela pourrait permettre de résoudre certains des plus grands défis de l'humanité, tels que la maladie, la pauvreté et les changements climatiques. D'autres estiment que cela pourrait être extrêmement dangereux, car les machines pourraient devenir plus intelligentes que les humains et pourraient prendre des décisions qui sont contraires aux intérêts humains. Il est important de noter que cela reste encore un sujet de débat et qu'il est difficile de prévoir les conséquences réelles d'un tel événement. ■

Source : cette interview, réalisée en janvier 2023, a été initialement publiée le 17 janvier 2023, en Note de veille de Futuribles International. URL : <https://www.futuribles.com/chatgpt-par-chatgpt/>. Consulté le 5 février 2023.

Décarboner les mobilités

Sept scénarios pour la France aux horizons 2040 et 2060

Par Dominique Auverlot et Alain Sauvant ¹

France Stratégie et l'Inspection générale de l'environnement et du développement durable (IGEDD) ont conjointement réalisé une étude prospective sur les transports et la mobilité aux horizons 2040 et 2060 dans la perspective de réalisation de l'objectif de la neutralité carbone que s'est assigné la France. Dans ce cadre, sept scénarios ont été produits, qui intègrent tant la mobilité des personnes que celle des marchandises ; cinq scénarios ne prennent pas en compte l'objectif de neutralité carbone comme donnée d'entrée et sont donc plus exploratoires (dits de forecasting) ; deux scénarios (dits de backcasting) ont pour contrainte d'atteindre la neutralité carbone du transport.

Dominique Auverlot et Alain Sauvant, qui ont coordonné cet exercice, en présentent ici les caractéristiques (approche, méthodologie...) et les grands enseignements, à savoir les sept scénarios, qui vont d'un scénario un peu plus optimiste que le tendanciel à des scénarios très ambitieux soit en termes de sobriété des comportements, soit sur le plan technologique. Il en ressort que seuls les deux scénarios de backcasting qui intègrent, par construction, l'atteinte de la neutralité carbone y parviennent. Forts de ce constat et des différents chiffreages réalisés lors de cette prospective, les auteurs présentent aussi neuf messages clés à destination des décideurs politiques, de sorte que ceux-ci aient en main les principales cartes indispensables pour placer le secteur des transports (routier, aérien, maritime), et plus généralement la mobilité, sur la voie d'une réelle décarbonation. Dans un second article publié dans ce numéro, ils complètent leur analyse par un focus sur les technologies les plus pertinentes pour favoriser cette décarbonation des transports. S.D.

1. Inspection générale de l'environnement et du développement durable (IGEDD, qui a remplacé le CGEDD, Conseil général de l'environnement et du développement durable, fin 2022) ; coordinateurs, avec Pierre-Alain Roche, du rapport *Prospective 2040-2060 des transports et des mobilités. 20 ans pour réussir collectivement les déplacements de demain*, Paris : France Stratégie, février 2022, 92 p. URL : https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/prospective_2040-2060_des_transports_et_des_mobilites_-_rapport_de_synthese_-_fevrier_2022.pdf. Consulté le 16 janvier 2023.

L'Inspection générale de l'environnement et du développement durable (IGEDD, rattachée aux ministères de la Transition écologique et de la Transition énergétique) et France Stratégie ont publié en 2022 un travail de prospective sur les transports : *Prospective 2040-2060 des transports et des mobilités : 20 ans pour réussir collectivement les déplacements de demain*². Cette démarche, dont les résultats ont été publiés début février 2022, a été conduite de façon itérative avec de nombreux experts. Une équipe d'une douzaine de rédacteurs³ a régulièrement échangé avec une centaine de spécialistes lors de réunions plénières et dans six ateliers de travail. Six rapports thématiques en rendent compte. Un rapport transversal détaillé et un rapport de synthèse en tirent les principaux enseignements.

L'approche proposée

L'approche proposée présente les principaux traits suivants :

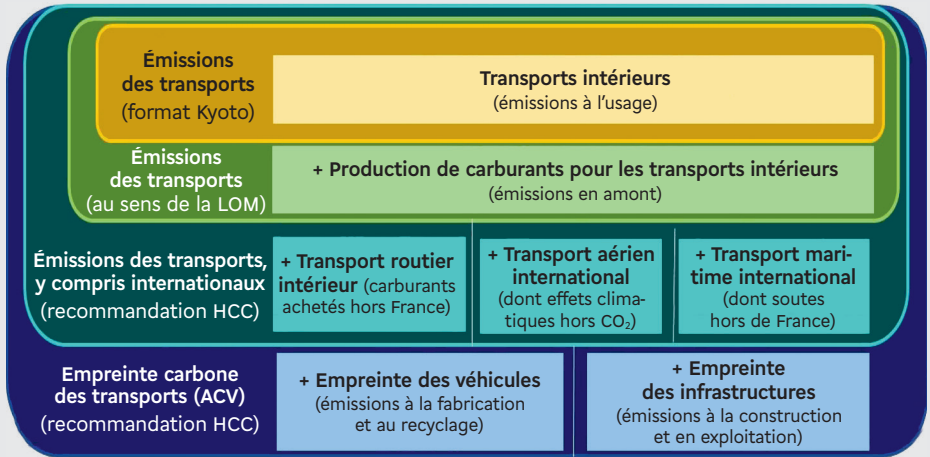
- ▶ Elle met l'accent sur l'urgence climatique et sur les enjeux d'acceptabilité et d'équité sociale, documente et interroge les questions de sobriété qui sont aujourd'hui au cœur de nombreux débats. Sans ignorer toutes les autres dimensions du questionnement sur les mobilités du futur, elle constate que le plus grand déterminant de celles-ci sera la question de l'empreinte carbone.
- ▶ Elle traite de l'enjeu des émissions de gaz à effet de serre du secteur par une approche en empreinte carbone « complète », incluant une analyse en cycle de vie (ACV) des véhicules et des infrastructures. De plus, elle élargit le périmètre aux transports internationaux maritimes et aériens concernant la France, qui ne sont pas les secteurs les plus faciles à décarboner. Elle est donc beaucoup plus exigeante que les analyses en émissions à l'usage (périmètre de Kyoto⁴) ou en empreinte des carburants concernant les seuls transports terrestres (loi d'orientation des mobilités). En cela, elle complète les analyses habituelles faites aux échéances de 2030 et de 2050 par deux grandes échéances au regard de la « neutralité en empreinte complète » : 2040 et 2060.

2. *Ibidem*. Le détail des travaux, qui comprend divers volets et rapports thématiques, est accessible sur le site Internet <https://www.igedd.developpement-durable.gouv.fr/20-ans-pour-reussir-collectivement-les-a3258.html>. Consulté le 16 janvier 2023.

3. Outre les auteurs du présent article : Nadine Asconchilo, Francis Beaucire, Régine Bréhier, Geoffroy Caude, Jean Colard, Yves Crozet, Pascal Hornung, Michel Massoni, Jincheng Ni, Pierre-Alain Roche et Michel Savy, appuyés pour la finalisation par Arnaud Zimmermann.

4. Les émissions de gaz à effet de serre comprennent, dans le format dit du périmètre de Kyoto, utilisé par la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques : les émissions de la France métropolitaine et des outre-mer inclus dans l'Union européenne (UE), mais n'intègrent pas les émissions internationales du maritime et de l'aérien.

Graphique 1. Les émissions de gaz à effet de serre des transports



LOM : loi d'orientation des mobilités ; HCC : Haut-Conseil pour le climat.

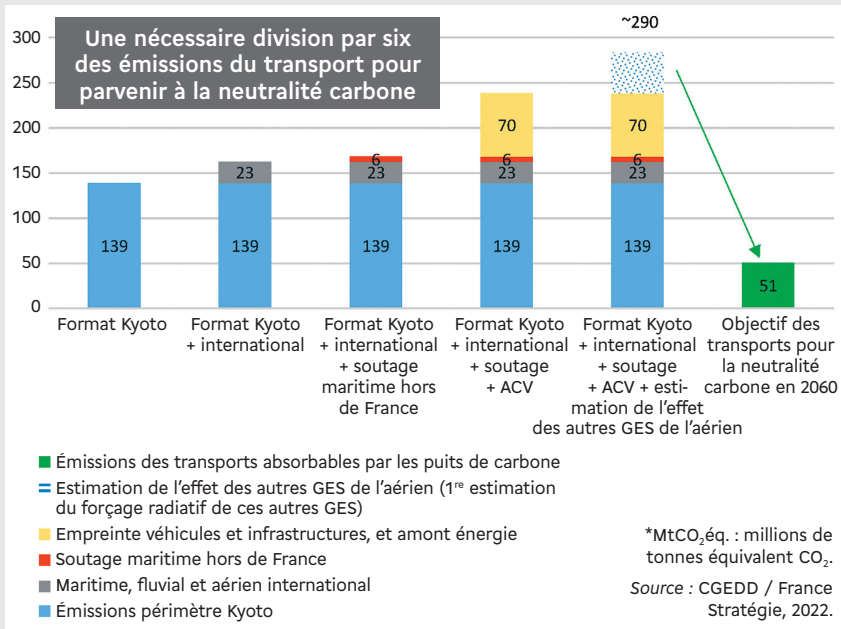
Source : CGEDD / France Stratégie, 2022.

► Elle combine des approches dites de *backcasting* partant d'un objectif à terme de neutralité carbone complète, et des approches dites de *forecasting* qui déroulent des avenir possibles, que ceux-ci soient considérés comme désirables ou non. Les approches de *forecasting* retracent diverses situations de technologie et de sobriété, mais ne sont pas construites pour atteindre strictement cette neutralité en empreinte complète. Ce sont elles qui ont été les plus discutées dans les ateliers thématiques, car elles sont les plus ancrées dans les tendances qui s'amorcent aujourd'hui. Les approches de *backcasting* « neutralité complète » tracent, au regard d'une estimation des puits de carbone affectables au secteur, une trajectoire du « budget empreinte carbone » collectif. Elles distinguent deux variantes mixant de façon contrastée la contribution de la technologie et celle de la sobriété. La plus radicale en termes d'évolution des comportements a été ajoutée à la suite des observations recueillies lors des consultations et relectures d'un premier projet de rapport.

► Elle tente des approches exploratoires pour prendre en compte les incertitudes et les risques dans l'organisation des politiques publiques. Le rapport *Risques et incertitudes*⁵ a ainsi travaillé à « préciser ce que nous ne savons pas », à la fois du point de vue des

5. *Prospective 2040-2060 des transports et des mobilités [...]*, rapport thématique *Risques et incertitudes*, coordonné par Michel Massoni et Alain Sauvant. URL : https://www.igedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/prospective_2040_2060_risques_et_incertitudes_cle2f2c61.pdf. Consulté le 16 janvier 2023.

Graphique 2. Émissions des transports en France en 2017 selon le périmètre retenu, comparées avec la neutralité carbone en 2060 (en MtCO₂éq.*)

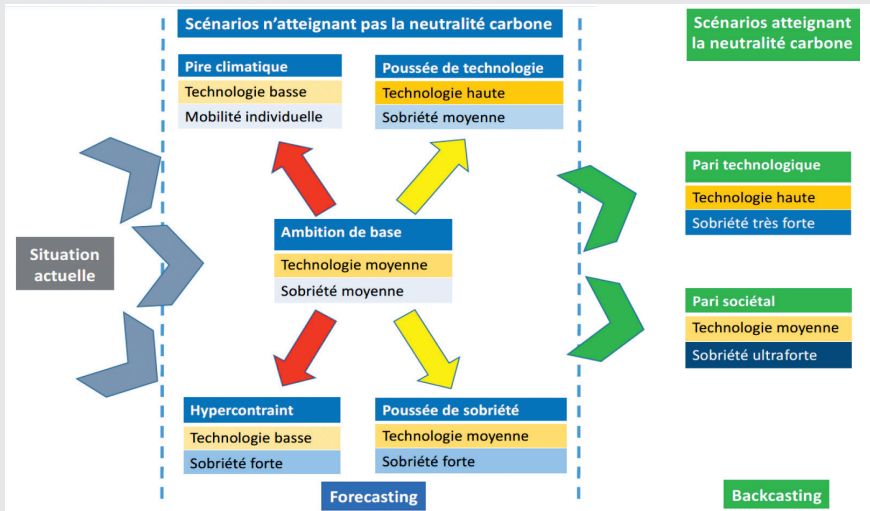


évolutions des technologies, des possibilités d'évolution des pratiques de mobilité ou bien de l'importance des enjeux de la transition écologique ; il esquisse à cet effet plusieurs méthodes pouvant éclairer les décisions publiques en horizon incertain — notamment la méthode de Monte-Carlo (probabiliste), celles des options réelles, l'*info-gap*. Il examine également les mérites d'une politique de décision flexible en fonction de l'observation des évolutions des incertitudes.

Sept scénarios pour rendre compte des futurs possibles

Afin d'illustrer de manière détaillée l'approche prospective des mobilités, sept scénarios ont été construits en croisant deux variables principales, déterminantes pour le calcul des émissions de gaz à effet de serre (GES), que sont les évolutions technologiques et les comportements (graphique 3), et en y intégrant les résultats des analyses menées sur les autres composantes du système, par exemple sur l'aménagement du territoire ou le transport des marchandises pour n'en citer que deux.

Graphique 3. Les scénarios : croisement des hypothèses de sobriété et de développement technologique



Source : CGEDD / France Stratégie, 2022.

Cinq de ces scénarios relèvent d'une logique de *forecasting*, c'est-à-dire qu'ils ne prennent pas l'objectif de neutralité carbone comme une donnée d'entrée :

— Le scénario « Ambition de base » intègre l'ensemble des mesures et objectifs décidés aujourd'hui. Les progrès technologiques y sont importants et les comportements plutôt parcimonieux. C'est donc un scénario plus ambitieux qu'une prolongation des tendances actuelles.

— Les scénarios « Poussée de sobriété » et « Poussée de technologie » considèrent l'un davantage d'efforts en termes de sobriété, et l'autre des avancées technologiques plus marquées.

— Le scénario « Hypercontraint » fait l'hypothèse qu'en l'absence d'amélioration technologique probante, les contraintes d'usage sont fortement renforcées. Dans ce scénario, le gouvernement impose des mesures de plus en plus drastiques (et de plus en plus mal acceptées par la population), ce qui entraîne la fermeture ou la délocalisation d'une partie de l'appareil industriel, une forte augmentation des importations et un ralentissement marqué de la croissance économique. Ce scénario aboutit vraisemblablement à des conflits sociaux et / ou à une crise qui ne permet plus de poursuivre la transition vers la neutralité carbone.

— Le scénario du « Pire climatique » allie de faibles progrès technologiques et une faible évolution des usages. Il constitue une

deuxième illustration des risques d'échec dans l'atteinte des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Il est marqué par l'absence de développement de nouvelles technologies bas-carbone, par une faible diffusion du progrès technologique liée à la défiance de la population à l'égard de la technologie, et par un délitement progressif de l'accord de Paris de 2015. Les mesures de régulation nécessaires à la lutte contre le réchauffement climatique ne sont pas acceptées par la population et ne sont donc mises en œuvre que de manière extrêmement modérée, ce qui en limite fortement l'efficacité.

Deux autres scénarios ont été construits dans une logique de *backcasting* à partir de l'objectif de neutralité carbone complète en 2060, l'un jouant davantage sur les leviers technologiques (« Pari technologique »), l'autre sur les leviers comportementaux (« Pari sociétal »). Le scénario « Pari technologique » retient les mêmes hypothèses technologiques que le scénario « Poussée de technologie », mais avec une sobriété plus importante. Le scénario « Pari sociétal » retient les mêmes hypothèses technologiques que les scénarios « Ambition de base » et « Poussée de sobriété », mais est beaucoup plus volontariste que tous les scénarios de *forecasting* en termes de sobriété.

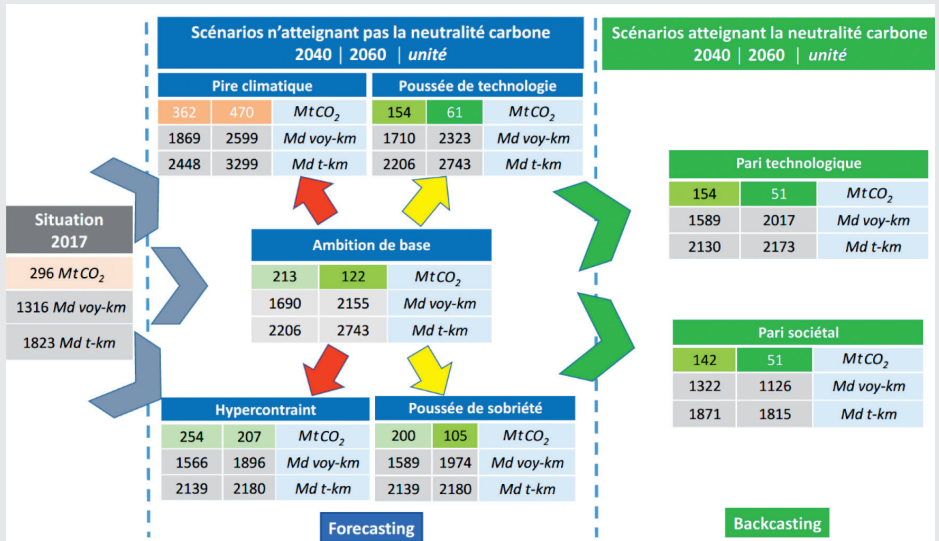
Le scénario « Ambition de base » affiche une baisse de 59 % de son empreinte carbone par rapport à 2018 (à 122 MtCO₂). Cette baisse serait obtenue malgré une forte progression des déplacements, des ménages comme des marchandises (respectivement + 64 % et + 50 %).

Seuls les deux scénarios de *backcasting* atteignent (par construction) la neutralité carbone en empreinte à l'horizon 2060, c'est-à-dire une émission résiduelle de 51 MtCO₂, correspondant à 53 %⁶ des émissions négatives (puits de carbone) de l'ensemble des secteurs, qui sont estimées⁷ à 95 MtCO₂. Le scénario « Pari sociétal » suppose une baisse de 14 % du nombre de voyageurs-kilomètres (km) (dont une division par deux des voyageurs-km aériens) et une stagnation des tonnes transportées. Le scénario « Poussée de technologie », qui fait des hypothèses en termes de déplacements très proches du scénario « Ambition de base » (8 % de plus de déplacements voyageurs, autant de tonnes transportées), permet néanmoins de s'approcher de la neutralité empreinte (61 MtCO₂).

6. Ce taux de 53 % est celui de la part des émissions des transports en 2017 en ACV, et en incluant l'international et les autres effets listés ici. Il est donc plus élevé que le taux de l'ordre de 30 % habituellement cité, qui ne comprend que les émissions des transports dans le périmètre de Kyoto.

7. D'après la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) 2 en 2050.

Graphique 4. Les résultats quantifiés des scénarios



Lecture : une matrice 3 x 3 présente pour chaque scénario et pour deux horizons de temps (2040 et 2060) les émissions de gaz à effet de serre ainsi que les trafics de voyageurs et de marchandises. Les chiffres de référence, correspondant à l'année 2017, figurent en partie gauche du tableau.

Source : CGEDD / France Stratégie, 2022.

MÉTHODOLOGIE DE LA QUANTIFICATION DES GAZ À EFFET DE SERRE

Dans chacun des scénarios, sont estimés, aux différents horizons décennaux jusque 2060, les émissions de GES (en tCO₂éq.) dans une analyse de cycle de vie (ACV) simplifiée, ainsi que les trafics de voyageurs et de marchandises.

La première étape consiste à construire une représentation schématique de l'année de référence, en l'occurrence 2017, à partir du rapport de la Commission des comptes transports de la nation (CCTN), en regroupant les différentes catégories de transport selon quatre rubriques : voyageurs terrestres, marchandises terrestres,

maritime, aérien. Les émissions de GES en ACV prennent en compte les émissions directes de l'année 2017, ainsi que celles associées à la fabrication des véhicules (et, dans une première estimation, à celle des infrastructures). Sont intégrées également dans ce décompte les émissions des transports maritimes et aériens internationaux (données CCTN), comme le recommande le Haut-Conseil pour le climat, ainsi qu'une estimation des effets de pouvoir radiatif (effectif) des autres GES de l'aérien, notamment des traînées de condensation aérienne qui, à un instant donné, peuvent représenter jusqu'à deux fois celles

du CO₂ de l'aérien depuis les débuts de ce mode de transport ¹.

Dans une deuxième étape, une tendance d'évolution des trafics, hors progrès de sobriété et de motorisation, est constituée en utilisant des élasticité des transports au produit intérieur brut (PIB) par habitant, ainsi que des projections de PIB par habitant correspondant aux scénarios centraux de l'INSEE (Institut national de la statistique et des études économiques) pour la France, et de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques / Forum international des transports) pour le reste du monde. Des progrès tendanciels liés à l'allègement des véhicules ou à la productivité des moteurs aériens sont également pris en compte pour la construction de ces évolutions de trafic.

Enfin, dans une troisième étape, pour chacun des quatre secteurs identifiés ci-dessus, chaque scénario et chaque horizon de temps, des coefficients multiplicatifs de motorisation et de sobriété sont définis afin d'estimer les kilomètres parcourus suivant les différents modes et les émissions de GES associées.

Exemple :

Les lignes suivantes donnent une idée du calcul pour les voyageurs terrestres dans le scénario « Ambition de base » : on part d'une estimation, correspondant à l'année 2017 qui sert de référence, de 940

milliards de voyageurs-km pour les transports terrestres de voyageurs (dont 564 pour les déplacements de la vie quotidienne et 376 en interurbain) et 121 MtCO₂éq.

Une première étape consiste à estimer ces éléments en 2060 en fonction de la tendance du PIB et de la population. Des élasticité de 0,48 au PIB par habitant en vie quotidienne et de 1,01 en interurbain ont été retenues, menant (avec un PIB/hab. passant de 36 084 à 63 938 euros 2020 ² [soit 1,3 % par an environ] et une population de 66,8 à 68,7 millions ³) à 764 milliards de voyageurs-km en vie quotidienne (soit + 35 %) et 690 milliards de voyageurs-km en interurbain (soit + 84 %), ainsi qu'une élasticité de 1 à la population, soit un total de 1 454 milliards de voyageurs-km, et 184 MtCO₂éq. Il n'y a pas d'évolution des motorisations à cette étape, les émissions de CO₂éq. sont donc proportionnelles aux évolutions du trafic (soit + 52 % pour l'ensemble des voyageurs terrestres).

Enfin, pour aboutir au scénario « Ambition de base » en 2060, on multiplie les émissions de GES issues de l'étape précédente par deux coefficients : un coefficient de motorisation en ACV de 0,25 et un coefficient de sobriété de 0,75, menant à des émissions de $184 \times 0,25 \times 0,75 = 34$ MtCO₂éq.

Le coefficient de sobriété de 0,75 découle lui-même du produit d'un coefficient de 0,85 au titre du déve-

1. Voir LEE David S. et alii, « The Contribution of Global Aviation to Anthropogenic Climate Forcing for 2000 to 2018 », *Atmospheric Environment*, vol. 44, janvier 2021, art. 117834. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231020305689>. Consulté le 17 janvier 2023.

2. Scénario du Conseil d'orientation des retraites, 2021.

3. Scénario central de l'INSEE, 2021.

loppement des transports collectifs urbains (TCU) lourds et du covoiturage (issu d'une étude OCDE de simulation d'un fonctionnement de système de mobilité partagée, après retraitement des densités), de 0,95 au titre du développement des modes doux (passant de 4 % à 9 % comme actuellement en Allemagne), de 0,96 au titre du développement du télétravail et assimilés (30 % des actifs, deux jours sur sept, 50 % d'effet rebond), 0,98 du fait des politiques d'aménagement (effet de 2 % au vu d'une modélisation plus complète), et 0,98 du fait de la hausse du coût de revient lié à la hausse de la taxe carbone (250 euros par tonne de CO₂ en 2060), estimée au moyen d'un impact sur les prix de l'énergie pour la mobilité puis d'une élasticité des voyageurs-km à ce prix (- 0,3).

Pour l'impact sur les voyageurs-km terrestres, le report modal ne change rien en première approche au total de tous les modes, et ne restent principalement que les

effets de modération des déplacements liés au télétravail et assimilés, et ceux de la hausse des coûts de revient liée à la taxe carbone, menant ainsi à $1\,454 \times 0,96 \times 0,98 = 1\,362$ milliards de voyageurs-km en 2060 dans ce scénario « Ambition de base ».

On ajoute ensuite les voyageurs aériens estimés selon une méthode similaire (forte élasticité [1,75] au PIB par habitant, donc forte croissance) (793 milliards de voyageurs-km y compris international) ce qui donne 2 155 milliards de voyageurs-km au total et 57 MtCO₂éq. en aérien. Un calcul similaire est effectué pour les marchandises terrestres (690 milliards de tonnes-km et 24 MtCO₂éq.) et maritimes, y compris internationales (2 053 milliards de tonnes-km et 7 MtCO₂éq.), menant à 2 743 milliards de tonnes-km, et pour l'ensemble voyageurs et marchandises $34 + 57 + 24 + 7 = 122$ MtCO₂éq. ■

D.A. et A.S.

De ce travail quantitatif ressortent neuf messages principaux

Une fois l'exercice achevé, les concepteurs de l'exercice ont souhaité attirer l'attention du politique sur les neuf messages suivants ⁸, issus de la vision globale des transports que présente l'ensemble des scénarios :

1. L'urgence climatique surplombe les réflexions sur le futur de la mobilité ⁹. Au vu de l'importance des émissions des transports (environ la moitié du total tous secteurs en ACV) et des difficultés

8. Les sources et raisonnements utilisés sont détaillés en notes de bas de page.

9. Les termes de mobilités et de transports employés ici couvrent, sauf précision contraire, à la fois les déplacements des personnes et ceux des marchandises.

prises en évidence (durée de vie longue des véhicules et encore plus longue des infrastructures et des villes, faible élasticité prix de la demande...), décarboner presque totalement les transports en une génération est nécessaire mais constituera un effort considérable et ne pourra pas se faire au dernier moment. Mais les incertitudes ne doivent pas détourner de l'urgence à agir, car les coûts de l'inaction¹⁰ (ou de l'action insuffisante) seraient encore plus lourds pour les générations suivantes.

2. Les usages des transports devront donc connaître des changements profonds, dans la mesure où les évolutions nécessaires des motorisations ne suffiront pas. Ces changements d'usage modérés figurant dans tous les scénarios pourraient nécessiter de devenir majeurs si les technologies les moins certaines n'étaient pas au rendez-vous, comme le montre le scénario « Pari sociétal ». Les jeunes sont souvent plus sensibilisés à ces évolutions, ou des groupes pionniers prêts à expérimenter de nouvelles pratiques, allant vers une mobilité plus mutualisée, plus collective. En même temps, le vieillissement de la population générera des besoins spécifiques de commodité des déplacements. Il est possible qu'il y ait des synergies entre les aides à la mobilité des personnes âgées ou en situation de handicap, et de moindres émissions en ACV par la miniaturisation des véhicules et de leurs moteurs (fauteuil roulant motorisé, exosquelettes...). La révolution en cours du numérique permet des améliorations notables, mais peut avoir des effets négatifs dont l'identification doit permettre la mise en place d'une régulation pertinente¹¹.

3. Il est possible de définir des politiques de décarbonation robustes, malgré les incertitudes sur le devenir des technologies et sur l'évolution de nos comportements, sous réserve de les réviser périodiquement. Les travaux menés sur les incertitudes¹² identifient en particulier la gravité du dérèglement climatique, ainsi que les surprises technologiques et en matière de ressources naturelles, comme principaux facteurs d'incertitude, nettement plus que le seul contexte de PIB ou de population par exemple.

10. Une tentative de comparaison au cours du XXI^e siècle des coûts des dommages (relation température dommage issue du modèle DICE [*Dynamic Integrated model of Climate and the Economy*] de William Nordhaus) et de leur évitement figure dans l'annexe *Risques et incertitudes*. Elle montre que les coûts des efforts d'évitement pèseraient largement sur la génération actuelle, mais que les coûts de l'inaction éventuelle (ou de l'action insuffisante) pèseraient sur les générations futures encore davantage, avec la possibilité de scénarios catastrophiques au-delà d'un seuil mal identifié.

11. Comme le montre le risque de doublement du trafic du fait d'un véhicule autonome non régulé (scénario du « Pire climatique »).

12. Voir le rapport thématique *Risques et incertitudes* pour plus de détails.

4. Des développements technologiques volontaristes, déjà amorcés, pourraient permettre une réduction notable des émissions du transport, mais leur déploiement rapide est loin d'être acquis. La mise en place de leviers économiques et réglementaires précoces est indispensable (interdiction de commercialisation de certaines motorisations à des échéances prévues avec 10 ou 20 ans d'anticipation, normes européennes d'émission, zones à faibles émissions « mobilité »...) pour parvenir au résultat ¹³. Ils seront d'autant plus efficaces qu'ils seront décidés à l'échelle internationale. Ils ne produiront enfin leur effet que si le chemin est jalonné d'étapes intermédiaires et accompagné à chacune de celles-ci, et si *in fine* la réalité du marché et des pratiques aura précédé l'entrée en vigueur des mesures d'interdiction. Parmi les solutions possibles, le basculement vers des motorisations électriques pour notamment les voitures et les poids lourds est d'autant plus pertinent que la France présente l'avantage de produire d'ores et déjà une électricité peu carbonée. La mise en œuvre généralisée à l'échelle mondiale de ces nouvelles technologies reste cependant soumise à la rareté des ressources. Si la décarbonation des motorisations est la priorité la plus visible aujourd'hui, les émissions à la fabrication et au recyclage ¹⁴ des véhicules et à la mise en place des infrastructures (bornes, modes alternatifs...) deviendront des facteurs essentiels par la suite (à partir de 2040 environ), dans la mesure où le chiffrage des scénarios montre que l'essentiel des émissions seront alors liées surtout aux véhicules, et assez peu à leurs parcours d'usage, à la différence de la situation actuelle.

5. La reconversion de l'industrie française et européenne du secteur, dont le poids économique est important (le chiffre d'affaires cumulé en France de l'industrie automobile et de la filière aérospatiale représente environ 250 milliards d'euros) ¹⁵, **est urgente**

13. Le cas norvégien montre qu'en additionnant toutes ces mesures, des bornes publiques abondantes (19 300 pour 647 000 véhicules électriques ou hybrides rechargeables en 2021, soit 3 %), dont une grande partie de haute puissance supérieure à 50 kilowatts, avec également des couloirs réservés aux véhicules propres et des facilités de stationnement, il a été possible d'obtenir un taux de 86 % de véhicules légers électriques (64 %) ou hybrides rechargeables (18 %) en 2021 au sein des ventes de véhicules neufs. Voir « Market Share of Electric Cars (BEV and PHEV) in Norway from 2009 to 2021 », Statista, 1^{er} septembre 2022. URL : <https://www.statista.com/statistics/1029909/market-share-of-electric-cars-in-norway/>. Consulté le 17 janvier 2023.

14. Ce qui suppose dès maintenant la définition de normes permettant le recyclage ultérieur à des conditions économiques abordables. En particulier, les batteries pourraient connaître une seconde vie dans des secteurs où les puissances nécessaires sont moindres que pour la mobilité.

15. MORÉNILLAS Noémie, « La filière aéronautique et spatiale en France en 2020. Un fort déclin de l'activité, mais des perspectives de reprise », *INSEE Première*, n° 1882, décembre 2021. URL : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5896539> ; et « Caractéristiques de l'industrie automobile

pour rester dans la compétition internationale. Elle demande un appui public pour les entreprises et leurs employés, et les territoires qui les accueillent. À travers le soutien à ces secteurs, qui représentent plusieurs centaines de milliers d'emplois directs, il s'agit, non pas de chercher à prolonger des industries fortement émettrices de gaz à effet de serre, mais de les aider à se reconverter et à produire des véhicules et des engins décarbonés pour soutenir l'emploi industriel en France. Faute de quoi, le risque de désindustrialisation est réel, notamment au vu des progrès majeurs de productivité et de qualité atteints dans le pays qui a bénéficié du plus grand marché automobile du monde et qui a mis en place des quotas¹⁶ de « nouveaux véhicules électriques¹⁷ » (la Chine).

6. Le transport de marchandises et la logistique qui lui est associée sont indispensables à l'économie française et à sa compétitivité dans un espace européen et international très concurrentiel. Ces secteurs sont vitaux dans la mesure où ils sont au service de l'ensemble des entreprises françaises, qu'elles soient industrielles, agricoles ou de distribution, exportatrices ou importatrices. Ces secteurs riches en emploi connaissent des évolutions fortes des conditions de travail et des statuts associés. Dans les trajectoires vers la neutralité carbone, ils vont fortement évoluer : la décarbonation des modes routiers et maritimes, la massification des transports par voie terrestre ou maritime, le report modal et l'optimisation des chaînes logistiques sont donc des priorités pour les politiques publiques. Elles doivent notamment se traduire par la rédaction de plans d'action concrets pour le fret ferroviaire¹⁸, avec des objectifs intermédiaires bien définis, par la mise en place de stratégies collectives pour la logistique nationale avec un accent particulier sur les plates-formes plurimodales et sur les aires urbaines pour la logistique urbaine, et par le maintien d'un juste équilibre entre les rythmes de décarbonation du secteur maritime

par activité. Données annuelles 2020 », INSEE, Chiffres-clés, 3 octobre 2022. URL : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2016146>. Consultés le 17 janvier 2023.

16. En Chine, l'acquisition d'un véhicule dans la plupart des grandes villes nécessite un gain aux enchères ou dans une loterie. Des quotas plus généreux de véhicules électriques ont été mis en place, garantissant l'atteinte des volumes de production planifiés.

17. Véhicules électriques à batterie, hybrides rechargeables ou à pile à combustible (hydrogène).

18. L'analyse effectuée dans le volet thématique *Marchandises. Transports routiers, ferroviaires, fluviaux et leur logistique urbaine* du rapport (URL : http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/prospective_2040_2060_fret_terrestre_cle1df587.pdf. Consulté le 17 janvier 2023), sur les perspectives de forte hausse du fret ferroviaire, a constaté que les liens de cause à effet entre les leviers envisagés et les hausses de trafic envisagées étaient à clarifier significativement, dans un contexte où les coûts d'un scénario de doublement de sa part modale seraient très vraisemblablement très élevés.

décidés en Europe et à l'Organisation maritime internationale (OMI) ¹⁹. La mise en place effective dans les coûts d'un signal-prix carbone est également souhaitable à une échelle aussi large que possible pour respecter les conditions de concurrence entre acteurs économiques.

7. La neutralité carbone complète ne peut être atteinte qu'en associant une plus grande sobriété d'usage (voyageurs et marchandises) **aux progrès technologiques** : mobilités actives, covoiturage, mutualisation et massification, réduction du nombre et de la longueur des parcours, report modal et développement de la qualité de service et de la fréquentation des transports collectifs... Il n'est pas acquis que les évolutions de comportement d'usage, dont la nécessité même n'est pas encore totalement partagée, résultent spontanément d'une démarche collective de « sobriété heureuse », qui s'étendrait progressivement à l'ensemble de la société. Le système de transport, à terme, pourrait donc reposer sur la mise en place de signaux économiques et sur un degré renforcé d'organisation et de coordination, pouvant inclure également, si nécessaire, des restrictions par des instruments d'action publique ²⁰.

8. Le renforcement de la trame urbaine de taille intermédiaire et le développement d'une plus forte attractivité résidentielle des centres urbains sont des facteurs décisifs à long terme pour la réduction des besoins de mobilité ²¹, et ainsi des émissions de gaz

19. La décarbonation du transport maritime passe essentiellement par l'usage de carburants décarbonés, mais il est difficile de donner aujourd'hui les parts respectives du méthanol, de l'ammoniac ou de l'hydrogène. La capture du carbone peut également être une voie, et un peu d'appoint vélique (voiles), voire de réduction de vitesse peuvent y contribuer également. Ces différentes évolutions coûtent cependant davantage que les carburants fossiles (une étude de l'OMI cite un ordre de grandeur de 400 euros par tonne de CO₂ évitée), ce qui suppose une approche harmonisée au sein de l'OMI pour que les différents armateurs progressent ensemble sans distorsion de concurrence dans un mode très mondialisé. Des politiques conditionnées par un passage par un port de l'Union européenne (UE) peuvent être envisagées, mais sont délicates du fait de la possibilité de toucher un port proche non contraint puis de continuer vers l'UE avec un petit navire local décarboné, mais sur court parcours.

20. Ce qu'envisage notamment le scénario de « Pari sociétal » (voir le volet thématique *Mobilité des personnes* du rapport, coordonné par Yves Crozet, Alain Sauvant et Jincheng Ni. URL : https://www.igedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/prospective_2040_2060_mobilite_des_personnes_cle5e12ba.pdf), par exemple avec une mesure de type « carte carbone » venant plafonner les émissions individuelles, avec des possibilités d'échange toutefois, éventuellement taxés dans une certaine mesure pour obtenir des ressources publiques utiles au financement de la transition. La division par deux des passagers-km aériens d'ici 2060 figurant dans ce scénario « Pari sociétal » implique vraisemblablement aussi des formes de restrictions quantitatives touchant ce secteur, qui est le plus difficile à décarboner du fait de la nécessité d'emporter l'énergie à bord et de la soulever, et qui ne participe pas à la réponse aux besoins souvent essentiels de mobilité de la vie quotidienne.

21. La densité favorise les modes collectifs qui sont moins émissifs. En effet, en l'absence de densité, les flux sont faibles, et donc les temps d'attente (ou de correspondance) sont majorés dans les transports massifiés. Pour plus de détails, on pourra se reporter au modèle figurant dans le volet thématique *Mobilité des personnes* du rapport, croisant densité et valeur d'action carbone.

à effet de serre et des impacts sur l'artificialisation des sols et la biodiversité. Leurs effets sont certes lents²², mais cela justifie des efforts volontaristes d'anticipation²³.

9. L'adhésion des Français à ce projet est l'enjeu le plus délicat. Elle est conditionnée par une répartition jugée équitable des efforts collectifs, tant au sein de la société française que quand celle-ci se compare aux autres pays. Elle repose sur la prise en compte de la diversité des univers de choix (l'accessibilité réelle des alternatives) et sur la mise en place simultanée, voire préalable, des mesures d'accompagnement²⁴ nécessaires, en faveur en particulier des premiers déciles. Les plus riches, qui émettent plus²⁵ et pour lesquels les choix sont plus ouverts, doivent s'attendre à être appelés à contribuer proportionnellement davantage aux efforts. Cette adhésion ne pourra cependant être véritablement obtenue qu'à l'issue d'un débat de société, bénéficiant de toute l'information possible et permettant à chacun d'envisager son devenir dans le cadre de cette transition.

En conclusion, le chemin ne va pas de soi. Et il est à construire collectivement, mais vite. ■

22. Le flux de construction de bâtiments ne dépasse pas environ 1 % du parc.

23. Voir notamment : BEAUCIRE Francis, COLARD Jean et HORNUNG Pascal, « Réduire la mobilité carbonée dans les territoires », *Urbanisme*, n° 428, novembre-décembre 2022, p. 22-25.

24. Individuelles (boucliers tarifaires, aides aux transports collectifs...) ou collectives (investissement dans les transports collectifs). Le ciblage des aides est toutefois délicat du fait de la grande diversité des situations.

25. Voir le volet thématique *Mobilité des personnes* du rapport pour plus de détails, reprenant des études notamment du cabinet Carbone 4. Le lien en première approche assez linéaire entre trafics et revenus en matière de transports terrestres est renforcé par l'usage bien plus important du transport aérien par le dernier décile (le plus riche).

ZOOM SUR LA NOTION DE SOBRIÉTÉ ET SES HYPOTHÈSES DE MISE EN ŒUVRE DANS LES SCÉNARIOS

Les coefficients de sobriété de chaque scénario en *forecasting* ont été définis à partir d'une appréciation du possible dans chaque secteur aux différents horizons en fonction de l'intensité des efforts recherchés. De manière très schématique, la feuille de route comprend, dans les années 2020 et 2030, une réorientation des investissements publics vers les infrastructures de transports collectifs et les modes doux, ainsi que des expérimentations en matière de covoiturage dans les périphéries des agglomérations, et une limitation de l'étalement urbain. Le prix du carbone est renforcé, avec des compensations pour les ménages aux plus faibles revenus.

À partir de 2040 environ, à l'occasion de l'arrivée des véhicules autonomes, une restructuration de la mobilité de la vie quotidienne se fait avec le développement des véhicules serviciels partagés (voitures et minibus), limitant le lien unissant le véhicule à son propriétaire à des cas où la fréquence des offres servicielles ne serait pas suffisante, par exemple en secteur rural ou périurbain lointain. Le degré de

massification et donc de sobriété est variable d'un scénario à l'autre, en fonction de l'intensité des leviers mobilisés (par exemple, le prix du carbone et les contraintes sur l'espace urbain alloué à la voiture). Les hypothèses du scénario « Ambition de base » correspondent à une extrapolation des résultats d'études de simulation détaillées du Forum international des transports (OCDE) sur cinq grandes agglomérations mondiales.

Dans les deux scénarios en *back-casting*, les coefficients de sobriété résultent du rapprochement entre la cible d'émissions de GES en ACV correspondant à la neutralité d'une part, et des coefficients de progrès des motorisations retenus (hypothèse haute ¹ ou moyenne ² selon les deux scénarios) d'autre part. Le quota d'émissions positives du secteur des transports a été estimé conventionnellement comme le produit de l'ensemble des émissions négatives tous secteurs (*source* : SNBC 2 à long terme) et de la part des émissions des transports en ACV en année de base 2017. Ils donnent l'ampleur des efforts de sobriété à accomplir, avec une

1. Scénario « Pari technologique » : toutes les technologies raisonnablement envisageables sont supposées obtenues et diffusées dans le parc d'ici 2060. Par exemple, pour les véhicules personnels, les émissions en ACV par km parcouru sont divisées par huit (notamment par allongement de la durée de vie des batteries vers 300 000 km, plus grand recyclage, allègement du véhicule), et celles des poids lourds par 10. Pour les avions, une filière hydrogène vert serait commercialisée vers 2035, avec une diffusion dans le parc en 25 ans, donc à temps d'ici 2060. Les ressources minérales et les biocarburants ne connaîtraient pas de tensions significatives.

2. Scénario « Pari sociétal », moins optimiste sur les progrès technologiques : les émissions des véhicules personnels ne seraient réduites que d'un facteur 4 (passage complet à l'électrique décarboné ou au biogaz, mais sans allongement notable de durée de vie des batteries par exemple), et d'un facteur 8 pour les poids lourds. Pour les avions, la filière hydrogène vert aurait pris plus de temps à être développée au vu de l'ampleur du défi technologique, et la décarbonation aurait découlé d'une incorporation de biocarburants, mais avec des contraintes de disponibilité des ressources ne permettant que l'atteinte d'un taux de 50 %, notamment en lien avec la compatibilité avec l'alimentation humaine et animale.

sous-répartition conventionnelle³ des efforts par leviers.

Toutefois, dans le scénario neutralité « Pari societal » correspondant à de faibles progrès technologiques, l'ampleur des efforts de sobriété requis dépasse le niveau des leviers pouvant être raisonnablement envisagés aujourd'hui. Il conduit ainsi à viser de fortes baisses des transports, particulièrement dans les modes les plus difficiles à décarboner comme l'aérien, ainsi qu'une acceptation de temps de trajet fortement majorés par un recours massif aux transports collectifs, y compris dans des zones de faible densité.

Ces efforts de sobriété seront particulièrement sensibles pour :

- Les ménages à faibles revenus qui ne pourraient pas supporter les surcoûts associés sans compensations adéquates individuelles et collectives (offre de transport public par exemple). L'identification des compensations raisonnables dans un contexte de situations très diversifiées est cependant loin d'être aisée.
- Les habitants des zones de faible densité, dans lesquelles des pistes de massification (transports collectifs, covoiturage) se traduiraient par des temps d'attente très élevés, ainsi que par une possible perte d'attractivité de ces territoires et de valeur des actifs résidentiels.
- Les personnes très sensibles aux dommages environnementaux, qui, en accord avec leurs convictions, réduiraient leurs déplacements et restreindraient, en pratique, les capacités des systèmes de transport.

Dans ce contexte, le débat societal sur l'ampleur des efforts de sobriété pourrait conduire à limiter les déplacements, en particulier dans l'aérien, en ne gardant que les déplacements les plus essentiels : c'est ce qu'envisage le scénario neutralité « Pari societal ». Les progrès technologiques pourront rendre ce débat moins insoluble mais ne permettront probablement pas de l'éviter complètement.

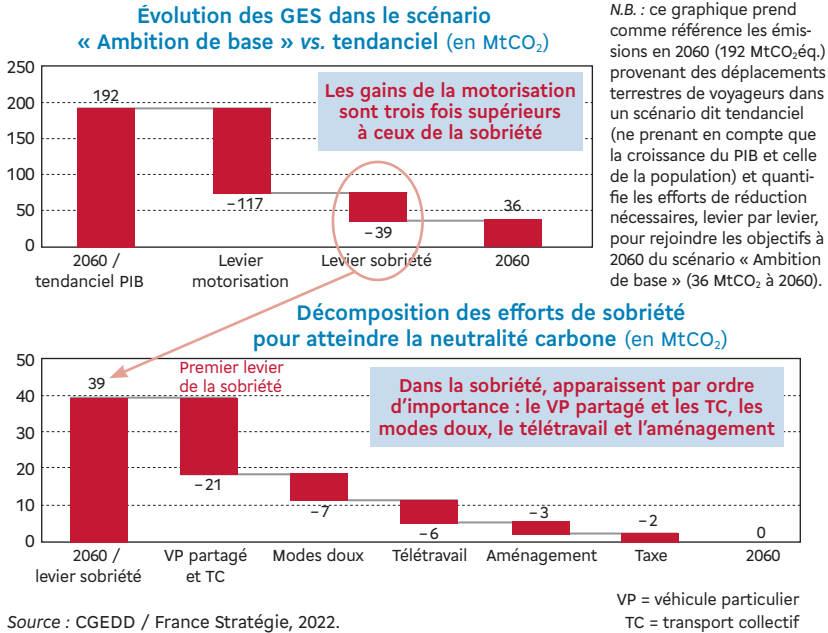
Le graphique 5 montre que dans le cas du scénario « Ambition de base », une grande partie des efforts de réduction des émissions provient des évolutions technologiques, mais que les efforts de sobriété sont également prioritaires : le covoiturage et le renforcement des modes de transport collectif en sont les leviers prioritaires.

Les politiques de sobriété ainsi envisagées comportent de fait plusieurs dimensions. Au-delà de la lutte contre le changement climatique, elles présentent souvent des coavantages en matière de qualité de vie en ville (par la réduction de la congestion ou la possibilité d'allouer l'espace urbain à d'autres activités que permettent les modes collectifs ou le covoiturage) ou de santé publique (modes doux notamment) :

- La hausse du nombre de passagers dans les véhicules grâce, par exemple, au développement du covoiturage. Celui-ci trouve tout son intérêt sur des axes et dans des zones moyennement denses où le renforcement des transports collectifs bute sur des contraintes économiques liées à leur faible potentiel de remplissage. Si le covoiturage s'est développé spontanément pour des trajets interurbains,

3. D'autres clefs de proratisation auraient été possibles, les coûts marginaux d'évitement du CO₂ dans les différents secteurs auraient été les clefs les plus efficaces, mais leur détermination n'a pas semblé faisable compte tenu de l'ensemble des incertitudes.

Graphique 5. Les différents leviers de la sobriété pour les déplacements terrestres de voyageurs dans le scénario « Ambition de base »



son développement pour des trajets urbains reste lent, du fait de la moindre possibilité de contrebalancer les pertes de souplesse et de temps par des économies monétaires liées au partage, inévitablement moins substantielles du fait des plus courtes distances. Un partage de voirie tenant compte du remplissage du véhicule serait toutefois un levier majeur. Des synergies peuvent également être mises en œuvre avec les politiques de stationnement, tant pour les voyageurs que pour les livraisons urbaines. Des politiques de massification routière peuvent aussi être explorées pour le transport des marchandises, mais plus difficiles à définir que pour le covoiturage

où l'on peut au moins compter le nombre de personnes à bord.

- Un renforcement des transports collectifs urbains lourds et ferroviaires (du train au bus à haut de niveau de service, en passant par le métro et le tram). Ces renforcements (y compris pour le fret ferroviaire) nécessitent, au-delà d'un partage renforcé de la voirie (plus de couloirs bus), de lourds investissements publics, et ne semblent pouvoir trouver un potentiel significatif à coût économique raisonnable que dans les zones et axes denses.
- La hausse des parts modales des modes doux et actifs (vélo, marche...) vers des niveaux plus

proches de certains pays voisins, par exemple l'Allemagne. Une telle politique passe, au-delà de la prise de nouvelles habitudes, par un redéploiement de l'espace de voirie, mais aussi probablement par des investissements pour traiter les points les plus durs permettant d'assurer les continuités d'itinéraire.

- Une substitution par des télécommunications lorsque celle-ci est possible, qu'il s'agisse de télétravail, ou bien de déplacements professionnels ou de divers services dématérialisés lorsqu'ils sont pertinents, par exemple la télémédecine. La part des emplois concernés par le télétravail (cadres, employés à processus numérisé) n'a cependant pas dépassé environ 30 % au plus fort de la crise sanitaire, et un mode de travail hybride semble se développer. Le scénario le plus ambitieux mise sur un plus grand nombre d'emplois à distance grâce aux progrès attendus des télécommunications. Le sujet des effets rebond reste un point fort de vigilance (autres déplacements

dans la journée, relocalisations plus lointaines), ainsi que celui des émissions induites dans d'autres secteurs (chauffage, télécommunications). D'autres effets de modération de la demande, correspondant par exemple au cas d'une ville où l'on peut trouver tout ou presque dans le quart d'heure, peuvent également constituer des pistes de progrès. Une modération des quantités de matériaux pourrait également être recherchée pour limiter les transports de marchandises.

- Enfin se pose la question d'un aménagement urbain plus compact, la densité favorisant la modération des distances et le recours aux modes collectifs. Toutefois, les impacts restent modérés, essentiellement du fait de l'inertie urbaine liée à un *ratio* entre constructions et stock de bâtiments de l'ordre du pour-cent seulement. À l'échelle du siècle, un horizon de 40 ans semble finalement assez court, ce qui n'empêche pas de commencer dès maintenant. ■

D.A. et A.S.

Quelles technologies pour décarboner les transports ?

Par Dominique Auverlot et Alain Sauvant ¹

Dans leur article publié précédemment dans ce numéro, Dominique Auverlot et Alain Sauvant ont présenté l'exercice de prospective mené par France Stratégie et l'Inspection générale de l'environnement et du développement durable sur les transports et la mobilité à 2040-2060, dans la perspective de réalisation de l'objectif de la neutralité carbone que s'est assigné la France. Pour compléter cette présentation et donner un exemple concret des dispositions qui pourraient accompagner cette transition vers la neutralité carbone, ils proposent ici un focus sur les technologies à mobiliser pour la décarbonation des transports.

Les transports sont aujourd'hui le premier secteur émetteur de gaz à effet de serre en France (30 % des émissions) ; ils constituent donc une étape essentielle de la transition écologique. Les auteurs présentent ici les options technologiques ouvertes pour les décarboner, en commençant par la motorisation (électrique, hybride, hydrogène, biocarburants...) des véhicules utilisés en transport routier. C'est selon eux un angle incontournable dans une stratégie visant à atteindre la neutralité carbone. Côté transport aérien, il faut, selon eux, miser sur la recherche et privilégier la conversion vers les biocarburants. Enfin, dans le transport maritime, troisième pan du secteur, l'heure est aux expérimentations, comme le montre cet article, avec deux voies prometteuses : le gaz naturel liquéfié avec capture du CO₂ et l'électricité pour les courts trajets. Au final, si la technologie ne peut résoudre à elle seule tous les problèmes d'émissions des transports, elle constitue toutefois, avec l'incitation à la sobriété, un levier essentiel de la décarbonation. Les pouvoirs publics doivent donc en tenir compte dans les incitations politiques et économiques qu'ils établissent pour mettre en œuvre leur stratégie bas-carbone. S.D.

1. Inspection générale de l'environnement et du développement durable (IGEDD, qui a remplacé le CGEDD, Conseil général de l'environnement et du développement durable, fin 2022) ; coordinateurs, avec Pierre-Alain Roche, du rapport *Prospective 2040-2060 des transports et des mobilités. 20 ans pour réussir collectivement les déplacements de demain*, Paris : France Stratégie, février 2022, 92 p. URL : https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/prospective_2040-2060_des_transports_et_des_mobilités_-_rapport_de_synthese_-_fevrier_2022.pdf. Consulté le 16 janvier 2023.

Cet article présente les principaux enseignements technologiques de la démarche prospective menée par l'Inspection générale de l'environnement et du développement durable, l'IGEDD, et France Stratégie en 2020 et 2021². Il couvre l'ensemble des transports de façon à identifier les secteurs qui, en l'absence d'autres solutions possibles pour atteindre la neutralité carbone, doivent utiliser des biocarburants et des e-carburants (issus d'électricité non fossile).

La décarbonation des motorisations est incontournable

L'objectif de neutralité carbone est extrêmement ambitieux : le secteur des transports a augmenté ses émissions de gaz à effet de serre (GES) de plus de 10 % depuis 1990. Pour aller vers la neutralité carbone, en France, il faut désormais les diviser par 10 selon la communication de la Commission européenne de décembre 2020³. Dans notre raisonnement en analyse de cycle de vie simplifiée (ACV), il faut les diviser par six.

Dès lors, nous ne pouvons plus nous contenter des efforts d'efficacité énergétique qui restent nécessaires mais qui ne peuvent réduire au mieux les émissions que par un facteur deux : à un moment, et c'est aussi l'enseignement de la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC), nous devons aller vers des motorisations et des carburants neutres en carbone, autrement dit des véhicules n'émettant pas de CO₂ à l'avancement ou utilisant des biocarburants ou des carburants de synthèse (dont la production ne repose pas sur des hydrocarbures d'origine fossile). Nous devons ainsi nous passer des hydrocarbures d'origine fossile en moins d'une génération.

Bonne nouvelle : les calculs réalisés en ACV, qui prolongent les travaux de l'IFPEN⁴ à 2040 et 2060, montrent que des gains extrêmement importants sont possibles à la fois pour les véhicules légers, mais aussi pour les bus, les autocars et les poids lourds. Seconde

2. Cet article s'inspire très largement du rapport thématique *Motorisation* coordonné par Dominique Auverlot, dans le cadre de la démarche de prospective présentée dans l'article précédent des auteurs dans ce numéro. URL : http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/prospective_2040_2060_motorisation_cle5adf8a.pdf. Consulté le 18 janvier 2023.

3. « Stratégie de mobilité durable et intelligente - mettre les transports européens sur la voie de l'avenir », Commission européenne, COM(2020) 789 final, 9 décembre 2020. URL : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0789&from=EN>. Consulté le 18 janvier 2023.

4. BOUTER Anne, MELGAR Joris et TERNEL Cyprien, *Étude ACV de véhicules roulant au GNV et bioGNV*, IFP-Énergies nouvelles (IFPEN), septembre 2019. URL : [https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/sites/ifpen.fr/files/inline-images/Innovation et industrie/Analyse du cycle de vie \(ACV\)/Rapport ACV GNV version finale.pdf](https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/sites/ifpen.fr/files/inline-images/Innovation%20et%20industrie/Analyse%20du%20cycle%20de%20vie%20(ACV)/Rapport%20ACV%20GNV%20version%20finale.pdf). Consulté le 18 janvier 2023. GNV = gaz naturel véhicule.

Tableau 1. Facteurs de réduction possibles des émissions de GES en ACV simplifiée à 2040 et 2060

Facteur de réduction par rapport à un véhicule thermique 2019	VP segment C	VUL	Bus	PL 40t
2040	4	4,6	7	8
2060	8	8	10	10

Lecture : ce facteur compare les émissions en ACV d'un véhicule neuf suivant qu'il est acheté en 2019, 2040 ou 2060. VP = véhicule particulier ; le segment C correspond à des véhicules compacts de moyenne gamme (type Peugeot 308 ou Renault Mégane IV) ; VUL = véhicules utilitaires légers ; PL 40t = poids lourds pouvant transporter jusqu'à 40 tonnes.

Source : *Prospective 2040-2060 des transports et des mobilités*, CGEDD / France Stratégie, 2022.

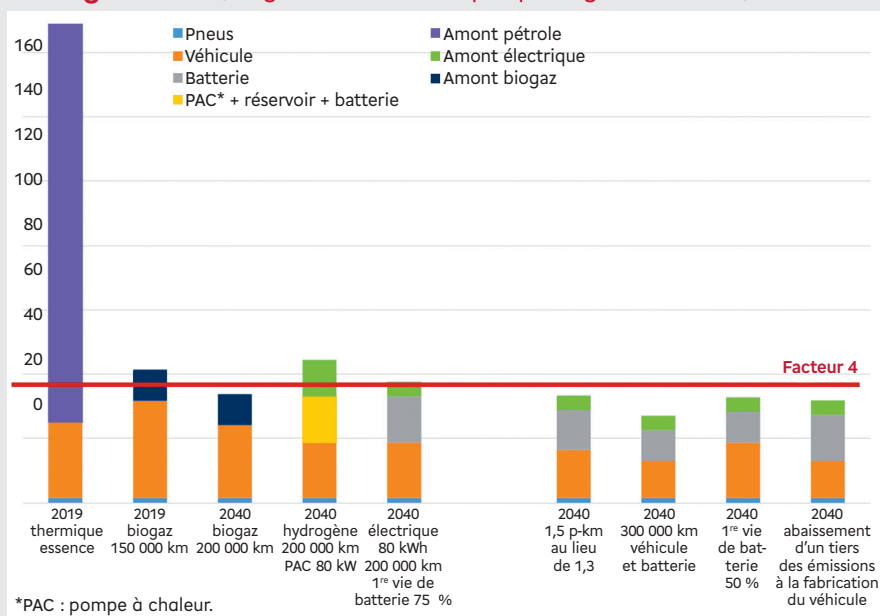
bonne nouvelle : plusieurs technologies semblent disponibles pour atteindre des résultats comparables : hydrogène, biogaz, électricité. La mise en œuvre de chacune d'entre elles comporte cependant un certain nombre d'écueils : coût et disponibilité pour le biogaz, coût et sécurité pour l'hydrogène, pollution locale liée à la fabrication des batteries pour les véhicules électriques, et naturellement disponibilité des ressources. Ces inconvénients conduisent, dans toute la mesure du possible et du raisonnable sur le plan économique, à prévoir la possibilité de développer plusieurs technologies différentes.

Le tableau 1 donne une idée des gains possibles pour un véhicule neuf aux horizons 2040 ou 2060 : il suppose cependant des changements importants dans l'utilisation des technologies. Pour obtenir de tels résultats, la durée de vie des véhicules particuliers est ainsi allongée en moyenne à 300 000 kilomètres en 2060 (ce qui est compatible avec les performances attendues des moteurs et des batteries électriques, mais suppose un changement de comportement des consommateurs et de la stratégie de vente des constructeurs) et les émissions à la fabrication sont réduites, grâce à l'allègement du véhicule et à des procédés et des matériaux plus décarbonés, de 30 %.

Pour les véhicules particuliers (VP) et les véhicules utilitaires lourds (VUL), il semble ainsi possible de parvenir en 2040, dans une analyse en cycle de vie, à des réductions des émissions de GES d'un facteur voisin de quatre, non seulement pour des véhicules électriques, mais également pour des véhicules utilisant d'autres types de carburant (biogaz, biocarburants...).

Les solutions hybrides auraient l'avantage de permettre la prolongation de vie des véhicules thermiques actuels, mais elles se heurtent à la disponibilité du biogaz ou des biocarburants, au

Graphique 1. Émissions en ACV à 2040 d'un véhicule du segment C (en grammes de CO₂ par passager-kilomètre)



Lecture : les trois premiers histogrammes sont issus des travaux de l'IFPEN. Le cinquième correspond aux émissions en ACV d'un véhicule électrique neuf en 2040 du segment C muni d'une batterie de 80 kWh et parcourant 200 000 km : comme le montrent la ligne horizontale rouge et les résultats du tableau 2, la réduction d'émissions peut atteindre un facteur quatre. Les quatre histogrammes de droite prennent ce véhicule en référence et envisagent soit un meilleur remplissage (1,5 passager/km en moyenne contre 1,4), soit un doublement des kilomètres parcourus durant la vie du véhicule, soit une deuxième et troisième vie de la batterie plus importante (avec une attribution de 50 % des émissions), soit enfin un nouvel abaissement de 30 % des émissions à la fabrication du véhicule.

Source : IGEDD en prolongation des travaux de l'IFPEN. L'ensemble des calculs est présenté en détail dans l'annexe 4 du rapport thématique *Motorisation (op. cit.)*, p. 115-121 pour les véhicules du segment C.

comportement des conducteurs qui ne rechargent pas toujours la batterie de leur véhicule, ainsi qu'à un coût à l'achat aujourd'hui plus élevé. L'hydrogène devrait également avoir du mal à contester le développement du véhicule électrique en raison de son coût. Ces calculs, de même que l'état des technologies, sous-tendant ces conclusions, sont présentés plus en détail dans l'annexe 4 du rapport spécifique relatif aux motorisations ⁵.

À 2060, ces mêmes actions poussées encore plus loin (électricité encore plus décarbonée, durées de vie de la batterie et du véhicule portées à 300 000 km, réductions supplémentaires d'émissions à la

5. « Annexe 4 : les réductions possibles d'émissions de gaz à effet de serre dans les différents secteurs du transport », in AUVERLOT Dominique (coord.), *Motorisation, op. cit.*, p. 113-173.

Tableau 2. Émissions en ACV d'un véhicule neuf de la catégorie C à la vente en 2019, 2030 et 2040 (en grammes de CO₂ par passager-kilomètre)

	2019 thermique essence	2030 électrique 80 kWh 150 000 km	2040 électrique 80 kWh 150 000 km Première vie de batterie : 75 %	2040 électrique 80 kWh 200 000 km Première vie de batterie : 75 %
Pneus	1,5	1,5	1,5	1,5
Véhicule	23,7	23,0	23,0	17,3
Batterie*		29,6	19,1	14,3
Amont pétrole	123,8			
Amont électricité		5,8	4,5	4,5
Total	149	59,9	48,1	37,6
Facteur de réduction par rapport à un véhicule à essence 2019		2,5	3,1	4,0

*Ici les valeurs correspondent à une fabrication de batteries de première génération de plus en plus décarbonées : l'empreinte carbone de la batterie à la fabrication (avec une fourniture à quasiment 100 % d'énergie décarbonée) pourrait atteindre 62 kg CO₂éq./kWh [kilogrammes d'équivalent CO₂ par kilowattheure] (en 2040) au lieu de 76 kg CO₂éq./kWh (en 2030), ce qui se traduirait par un gain d'un peu moins de 20 %, plus précisément de 4,2 grammes de CO₂éq./km. Ce gain semble raisonnable sur les batteries actuelles. L'empreinte carbone des batteries dites solides ainsi que d'autres compositions éventuelles peut modifier ces valeurs, sans qu'il soit possible à ce stade de donner un ordre de grandeur, ni même la tendance à la hausse ou à la baisse : l'IFPEN indique cependant que des publications récentes montreraient qu'en 2050, les émissions tendraient vers une valeur de 60-70 kg de CO₂éq./kWh avec la technologie lithium-ion, et qu'elles pourraient basculer vers 20 kg de CO₂éq./kWh de batterie en cas de rupture technologique. De plus, en tenant compte des deuxième et troisième vies de la batterie, leur empreinte carbone pourrait vraisemblablement être réduite d'un facteur supplémentaire que l'on pourrait estimer à 25 % (estimation grossière en première approximation qui paraît cependant raisonnable si on arrive à donner à la batterie une deuxième vie dans un usage stationnaire pour le bâtiment, et une troisième vie à travers un recyclage important) : le gain serait cette fois de 6,3 grammes de CO₂éq./km et conduirait ainsi à 19,1 grammes de CO₂/passager-km. Enfin, l'extension de la durée de vie du véhicule et de la batterie de 150 000 km à 200 000 km permettrait de gagner un facteur supplémentaire de 25 % sur les émissions à la fabrication du véhicule et de la batterie.

Par ailleurs, le contenu carbone de l'électricité utilisée devrait également décroître : reprenant le scénario Volt de RTE (Réseau de transport d'électricité), un contenu carbone de l'électricité de 30 grammes de CO₂éq./kWh en 2040 (le scénario Volt raisonne à 2035) peut ainsi être estimé, contre 55,7 grammes en 2019, ce qui se traduirait, pour un véhicule électrique du segment C avec une batterie de 80 kWh (parcourant 150 000 km), par un gain total d'environ 1,3 gramme de CO₂éq./km.

Lecture : les deux premières colonnes reproduisent les chiffres des calculs menés par l'IFPEN dans le rapport déjà cité, les deux dernières correspondent aux calculs menés par l'IGEDD.

Source : tableau 10 (p. 119) du rapport thématique *Motorisation* (op. cit.). Les hypothèses détaillées figurent p. 115-123 de ce même rapport : le nombre moyen de passagers par kilomètre est de 1,4.

fabrication du véhicule, meilleur recyclage de la batterie) et illustrées dans le graphique 1 sous forme de calculs de sensibilité sur le véhicule électrique à 2040, amèneraient naturellement à des gains plus importants.

Pour que de telles évolutions puissent se produire, certains éléments sont cependant nécessaires :

► La mise à disposition de bornes de recharge (lente et) rapide pour l'électrique en nombre suffisant est un point clef : leur absence conduirait les automobilistes à rechercher une plus grande autonomie et à s'équiper de batteries plus importantes (capacité de 100 kWh, voire plus), et donc à augmenter les émissions à la fabrication.

► La recherche d'une durée de vie nettement plus importante des véhicules : dès lors que les émissions à la fabrication des véhicules représentent la part majeure, il convient, pour aller plus loin dans leur réduction, de chercher à diminuer le nombre de véhicules vendus chaque année et de prolonger fortement leur durée de vie. Cette réduction souhaitable du nombre de véhicules fabriqués, inenvisageable sur le très court terme par l'industrie automobile, doit cependant pouvoir être intégrée dans des prévisions de moyen-long terme. Dans un premier temps néanmoins, il convient, avant de chercher à prolonger la durée de vie des véhicules, d'aller vers des motorisations utilisant des carburants alternatifs : le bonus-malus peut y contribuer largement.

► Les signaux économiques principaux doivent dès lors porter sur l'achat des véhicules et sur les émissions de carbone en circulation (pour les véhicules thermiques encore présents), mais aussi à la fabrication, ce qui conduit à mettre en avant la notion d'empreinte carbone du véhicule et à lui associer, à l'achat, le coût correspondant des externalités.

À terme, le coût d'un véhicule et les émissions de CO₂ associées à un kilomètre supplémentaire parcouru devraient donc être nettement moins élevés qu'aujourd'hui, ce qui pourrait modifier les parts modales et entraîner un rebond du véhicule automobile.

D'un point de vue économique, le rapport de la commission présidée par Patrick Criqui sur les coûts d'abattement dans les transports ⁶ montre que si le coût d'abattement associé à la mise en place d'un véhicule électrique est supérieur aujourd'hui à la valeur de l'action pour le climat, 250 euros par tonne de CO₂, ce coût devient inférieur dès 2025 pour la citadine électrique, et en 2030 pour la berline électrique : « Au total, pour les véhicules particuliers, les véhicules électriques

6. *Les Coûts d'abattement. Partie 1. Méthodologie et Partie 2. Transports*, rapport de la commission présidée par Patrick Criqui, France Stratégie, juin 2021. URL : <https://www.strategie.gouv.fr/publications/couts-dabattement>. Consulté le 19 janvier 2023.

remplissent à la fois les critères de rentabilité à moyen terme et de potentiel important de décarbonation et semblent être une solution “sans regret”. [...] Cet indicateur de coût d’abattement ne permet pas vraiment de discriminer véhicules hybrides et électriques à batterie, dont la rentabilité socioéconomique advient au même horizon. Cependant, [...] dans la mesure où les véhicules hybrides induisent des émissions résiduelles incompatibles avec la décarbonation complète du transport terrestre, ils semblent appelés à ne jouer qu’un rôle transitoire dans la transformation du parc automobile. Cette considération invite notamment à limiter les efforts en faveur des motorisations hybrides afin d’éviter les effets de verrouillage ou de *lock-in* ⁷. »

Les principaux poids lourds existant actuellement consomment du diesel ou du gaz naturel, biogaz ou gaz fossile. Les camions électriques, à hydrogène, voire hybrides ou à caténaire sont en cours de développement. Dans ces conditions, les analyses menées ont cherché à imaginer ce que pourrait être un poids lourd, électrique ou à hydrogène, dont le poids total autorisé en charge (PTAC) serait de 40 tonnes, pour pouvoir mener des calculs d’ACV. Ceux-ci ne prétendent donc pas être exacts compte tenu du grand nombre d’approximations nécessaires. Ils donnent néanmoins des ordres de grandeur suffisamment clairs et robustes pour permettre la réflexion et encourager la réalisation d’ACV parfaitement rigoureuses.

De fait, si les premières réflexions fin 2019 du groupe de travail ont porté sur la possibilité de concevoir des poids lourds électriques de 40 tonnes en s’inspirant des annonces d’Elon Musk et de Tesla, et des analyses de l’organisation Transport et environnement ⁸, 2023 devrait voir leur matérialisation. Tesla a déployé ses premiers mégachargeurs en 2021 et devrait livrer ses premiers exemplaires dans les prochains mois, même si la production de série n’est pas encore lancée. En Europe, la plupart des constructeurs de poids lourds ont désormais dans leur catalogue des camions électriques de 26 tonnes et des premiers poids lourds de 40 tonnes font leur apparition ⁹. Hyundai, de son côté, a déjà livré plusieurs dizaines de camions à hydrogène en Suisse.

7. *Ibidem*, Partie 2. *Transports*, p. 13-14.

8. Voir en particulier : EARL Thomas *et alii*, « Analysis of Long Haul Battery Electric Trucks in EU: Marketplace and Technology, Economic, Environmental, and Policy Perspectives », article présenté au « 8th Commercial Vehicle Workshop », Graz, 17-18 mai 2018. URL https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/20180725_T&E_Battery_Electric_Trucks_EU_FINAL.pdf. Consulté le 19 janvier 2023.

9. Voir par exemple POLLOK Murray, « Avesco Uses 40t Electric Truck for Transport », *International Rental News*, 19 octobre 2021. URL : <https://www.internationalrentalnews.com/news/avesco-uses-40t-electric-truck-for-transport/8015637.article>. Consulté le 19 janvier 2023.

Une division par un facteur supérieur à quatre, voire cinq, des émissions de GES en ACV simplifiée serait envisageable dès aujourd'hui pour un poids lourd électrique ou biogaz de ce type par rapport à un poids lourd thermique actuel, et par un facteur voisin de 2,5 à 3 pour un poids lourd à hydrogène (que le gaz soit comprimé à 700 bars ou sous forme liquide¹⁰). Une division par huit des émissions de GES en ACV simplifiée serait envisageable à l'horizon 2040 pour un poids lourd électrique (avec report de 30 % des émissions de fabrication de la batterie sur sa deuxième vie et sur son recyclage) et pour un poids lourd au biogaz par rapport à un poids lourd thermique actuel. Le facteur serait de cinq à six pour un poids lourd à hydrogène.

Une transition est ainsi possible vers une mobilité décarbonée, en particulier électrique, pour le transport de marchandises, mais elle reste à venir et pose la question des stratégies industrielles (des entreprises, des territoires ou des pays). Peu de poids lourds électriques ou à hydrogène sont réellement en circulation aujourd'hui et il faudra attendre quelques années avant qu'ils ne deviennent une véritable option à l'achat. Cette transition s'appuiera d'abord vraisemblablement sur des marchés de niche, en particulier la livraison des marchandises en ville avec le passage à l'électrification des poids lourds destinés à ce type de livraison, ainsi que des poids lourds régionaux, avant de concerner la longue distance : elle sera d'autant plus rapide que le prix au kWh des batteries convergera vers celui, en baisse constante, des batteries propres aux automobiles. Si les prix de l'hydrogène à la pompe sont suffisamment bas, les poids lourds à hydrogène pourraient concurrencer l'électrique sur la longue distance, dans la période 2030-2040. Cette transition peut néanmoins se heurter à de nombreux obstacles : refus de l'opinion de voir se développer des batteries de grande capacité pour la mobilité électrique des poids lourds ; volonté des constructeurs actuels de continuer à vendre les modèles thermiques qu'ils ont développés ; faible déploiement des bornes de recharge rapide

10. L'hydrogène à 700 bars représente un volume sept fois supérieur à celui de l'essence ou du gazole (et 6,9 fois supérieur pour le kérosène), tandis que, pour l'hydrogène liquide, le facteur sera de 3,8 par rapport à l'essence et de 4 par rapport au kérosène. Dans les applications où le volume est particulièrement contraint, ce qui est le cas de l'aviation, le choix se portera dès lors sur l'hydrogène liquide. Mais, même dans ce cas, un réservoir quatre fois plus volumineux que les réservoirs actuels va conduire, pour les long-courriers, à devoir envisager un *design* révolutionnaire de l'appareil, qui pourrait prendre la forme d'une aile volante. Cette réduction de volume a cependant un coût : l'énergie nécessaire pour compresser l'hydrogène respectivement à 200 ou à 700 bars, ou pour le liquéfier, correspond en effet à 7 %, 15 % et 35 % de l'énergie contenue dans le réservoir. Certains industriels (Mercedes-Benz, Faurecia en partenariat avec Air Liquide...) envisagent ainsi d'utiliser l'hydrogène liquide pour les poids lourds.

(80 %) d'un poids lourd en moins d'une demi-heure ; rareté possible d'un certain nombre de matériaux en l'absence de développement de filières de recyclage ou de recours à des substituts ; choix technologiques différents entre les pays européens. À l'inverse, elle peut être accélérée par le refus des agglomérations de laisser circuler des moteurs diesel en centre-ville et par le développement des zones à faibles émissions (ZFE), prévu par la loi d'orientation des mobilités.

Si un nombre suffisamment grand de bornes de recharge rapide pour poids lourds n'est pas déployé sur les autoroutes, les routes nationales et les principales routes interurbaines, les automobilistes et les professionnels chercheront à se prémunir contre le risque de tomber en panne et achèteront des batteries d'une taille nettement supérieure à leurs besoins : personne n'y a intérêt. Le déploiement rapide d'un réseau de recharge rapide est donc souhaitable.

Dans tous les cas, la transition sera favorisée si la Commission européenne adopte (en les annonçant suffisamment à l'avance) des *standards* d'émission de plus en plus rigoureux au fur et à mesure du temps, si une date pour l'arrêt de la vente des poids lourds thermiques est annoncée (cas de la France à 2040 avec la loi portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets), si les stations ou les emplacements de recharge se développent en nombre suffisant, si les camions à énergie alternative bénéficient de conditions économiques avantageuses (tarifs de péage adaptés, comme en Suisse, amortissement...) et si un signal-prix carbone est mis en œuvre (de préférence à l'échelle européenne).

L'autoroute électrique alimentant les véhicules par caténaires ou par le sol pourrait constituer à l'évidence une bonne solution : elle permettrait en effet de réduire la taille des batteries. Mais la technologie des caténaires n'est pas mûre pour cet usage : il ne peut donc pas y avoir de choix aujourd'hui d'une technique qui se déploierait dans l'Union européenne. Elle rencontre de plus un problème de financement : les transporteurs n'achèteront des poids lourds adaptés à ce système que lorsqu'il sera déployé très largement sur les autoroutes européennes, ce qui conduit, comme dans une industrie de réseau, à un financement (relativement important) à perte de l'infrastructure au départ. Par ailleurs, les caténaires peuvent être arrachées si le poids lourd quitte trop brusquement sa voie de circulation. Les solutions au sol (par induction

ou par conduction) souffrent du même problème de financement et sont à un stade de maturité moins avancé, ce qui ne permet pas, là encore, de privilégier une technique par rapport à une autre. Sur ces deux points, le lecteur pourra consulter avec intérêt les analyses du groupe de travail mis en place par le ministère de la Transition écologique sur ce sujet ¹¹, ainsi que le rapport de l'International Council on Clean Transportation (ICCT) ¹².

Pour les bus, la situation est plus simple : les technologies sont présentes dès aujourd'hui, il est donc souhaitable de réaliser la transition dès maintenant. Les analyses en cycle de vie, notamment menées par l'IFPEN, aboutissent à des facteurs de réduction extrêmement importants à très court terme : en 2030, les bus électriques et bioGNV représentent une diminution par un facteur supérieur à sept par rapport à leur équivalent thermique 2019.

À 2040, la réduction des émissions devrait être encore plus importante si l'on considère la diminution progressive du contenu carbone de l'électricité, la baisse des émissions lors de la fabrication des batteries, ainsi que la prise en compte de leur recyclage et de l'allongement de leur durée de vie qui devrait permettre de n'utiliser qu'une seule batterie durant toute la durée de vie du véhicule, ce qui diviserait quasiment par deux les émissions de ce poste : une division par 10 des émissions de gaz à effet de serre serait alors atteignable !

Au final, il apparaît que dès aujourd'hui les gains apportés en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de particules aboutissent à un facteur de réduction des émissions de GES supérieur à cinq, y compris pour des bus à hydrogène, ce qui devrait conduire à accélérer le déploiement de ces motorisations, même si leur coût actuel reste élevé.



Jacky D / Shutterstock

11. Système de route électrique [ERS]. Groupe de travail n° 1. Décarboner le transport routier de marchandise par l'ERS, enjeux et stratégie ; et Groupe de travail n° 2. Solutions techniques, potentialités et verrous, juillet 2021. URL, respectivement : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/GT1_rapport_final.pdf ; et https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/GT2_rapport_final.pdf. Consultés le 19 janvier 2023.

12. MOULTAK Marissa, LUTSEY Nic et HALL Dale, *Transitioning to Zero-emission Heavy-duty Freight Vehicles*, Livre blanc de l'ICCT, septembre 2017. URL : https://theicct.org/sites/default/files/publications/Zero-emission-freight-trucks_ICCT-white-paper_26092017_vF.pdf. Consulté le 19 janvier 2023.

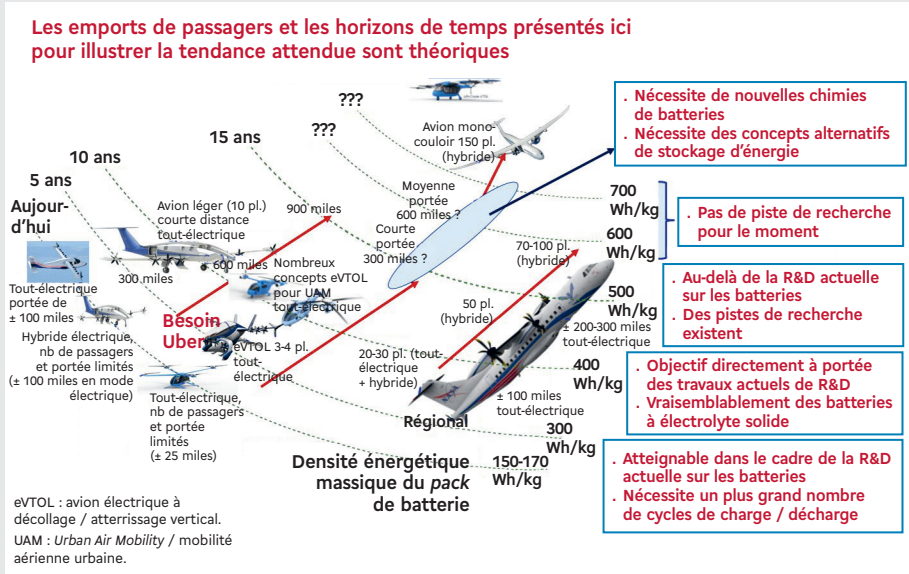
Décarbonation de l'aérien : le temps de la recherche et une priorité d'usage des biocarburants ¹³

La décarbonation du transport aérien nécessite de mener de front la recherche et développement sur des avions ultrasobres (réduction de 30 % de la consommation par rapport aux meilleurs avions d'aujourd'hui), le développement de la production de biocarburants durables, l'amélioration des trajectoires, etc. Là encore, la neutralité carbone du secteur aérien reposera à terme sur l'utilisation de carburants neutres en carbone et la mise au point d'avions zéro émission (qui bénéficieront également des recherches faites sur l'ultrasobriété) : l'utilisation de l'hydrogène liquide représente un défi passionnant et redoutable pour la recherche. Mais, si l'électrique pour des avions de petite taille régionaux, et l'hydrogène pour des avions allant jusqu'au court-courrier vont très certainement participer à la décarbonation du secteur, l'utilisation de l'hydrogène liquide pour les long-courriers nécessite un *redesign* complet de l'avion ; cette solution ne sera donc pas disponible avant plusieurs décennies... Dans ces conditions, la seule solution actuelle pour la décarbonation de l'aviation moyen- et long-courrier réside dans l'utilisation de biokérosène ou d'e-kérosène durable.

En admettant qu'avec les améliorations technologiques prévues, il soit possible, conformément aux hypothèses de la SNBC, de limiter la consommation de kérosène à moins de neuf millions de tonnes d'ici 2050, il faudrait produire 3,6 millions de tonnes de carburants durables afin que leur proportion puisse atteindre 50 % dans le kérosène utilisé par l'ensemble des vols long-courriers. Une décarbonation totale nécessiterait le double. L'objectif est ambitieux mais possible : en 2019, la France a ainsi incorporé 3,46 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) de biocarburants dans les véhicules terrestres. Ceci conduit probablement, ainsi que l'envisage la stratégie de mobilité durable et intelligente publiée par la Commission européenne en décembre 2020, à accorder une priorité à l'usage des biocarburants dans l'aérien. D'un point de vue économique, l'imposition des quotas d'incorporation de biokérosène et d'e-kérosène au secteur aérien avec une pénalité suffisante, devrait permettre de mettre en œuvre cette priorité progressivement dans le temps.

13. Sur l'aérien et le maritime, le lecteur pourra également se référer à : AUVERLOT Dominique, CAUDE Geoffroy et LEMPEREUR Thierry, *La Décarbonation et la réduction des émissions atmosphériques polluantes des transports aériens, maritimes et fluviaux. Article 81 de la loi d'orientation des mobilités*, rapport du CGEDD au ministère de la Transition écologique, février 2021. URL : https://ligedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/Affaires-0011868/013277-01_rapport_publi%C3%A9.pdf;jsessionid=1063009635023AC5C0D6112735C7F203. Consulté le 19 janvier 2023.

Graphique 2. Feuille de route du développement de l'avion électrique présentée par la NASA* en 2018



*National Aeronautics and Space Administration.

Lecture : la densité énergétique massique des batteries (inférieure à 400 Wh/kg) et la puissance transférable à chaque moteur (inférieure à 1 MW) limitent à moyen terme l'avion tout-électrique à des distances voisines de quelques centaines de kilomètres avec quelques dizaines de passagers.

Source : MISRA Ajay, « Energy Storage for Electrified Aircraft Challenges and Opportunities », Polish-American Conference on Science and Technology, Columbus, Ohio State University, 17 avril 2019. URL : <https://ilot.lukasiewicz.gov.pl/wydawnictwa-naukowe/19-PAC/Site/2.3.Ajay-Misra.html>. Consulté le 19 janvier 2023.

Une évolution majeure est de plus à noter depuis la parution de la prospective, que celle-ci appelait d'ailleurs de ses vœux : lors de la 41^e assemblée générale de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) en octobre 2022, les représentants des 193 États de l'OACI ont adopté un objectif collectif à long terme de zéro émission de carbone au milieu du siècle pour le secteur aérien civil.

Le maritime : le temps des expérimentations

Il n'existe pas aujourd'hui de solution unique et universelle qui permettrait d'atteindre à la fois la neutralité carbone et la dépollution du secteur, ce d'autant plus que la diversité des navires et de la puissance de motorisation est très variable. Il apparaît cependant clairement que le *design* initial du navire (et dans une mesure moindre, son rétrofit pour la flotte existante), ainsi qu'une combinaison de mesures opérationnelles peuvent très fortement réduire les émissions de gaz à effet de serre. De plus, des systèmes

de propulsion neutres en carbone sont envisageables, mais ils sont encore dans une phase de démonstration.

Une double priorité s'en déduit :

► Il est nécessaire d'une part de mener des expérimentations, soutenues en partie par la puissance publique et par l'Union européenne, de mise en œuvre de systèmes de propulsion neutres en carbone, ainsi que des technologies les plus prometteuses de décarbonation.

► Dans la période de transition jusqu'à la neutralité carbone du maritime, il est nécessaire de faire les meilleurs efforts possibles pour réduire les émissions correspondantes.

Deux technologies permettant de se rapprocher de la neutralité carbone apparaissent cependant extrêmement prometteuses et méritent d'être fortement encouragées :

► Le recours au gaz naturel liquéfié (GNL) équipé d'un dispositif de capture et de stockage du CO₂ pour les navires les plus importants. Cette technologie permettrait de conserver les motorisations existantes ainsi que les chaînes d'approvisionnement en gaz naturel. L'installation de ce dispositif à bord d'un navire utilisant le GNL comme carburant permet de bénéficier d'une source froide pour la liquéfaction du CO₂ et de la chaleur de la combustion pour la régénération du solvant.

► Le recours à l'électricité pour les bateaux et navires effectuant des courts trajets (*short sea shipping ferries*, navires de service) ou ceux pouvant effectuer des arrêts réguliers pour se recharger. Compte tenu du faible contenu en carbone de l'électricité française, cette technologie permet en effet d'atteindre une quasi-neutralité carbone ¹⁴ dès aujourd'hui pour les bateaux concernés.

Il n'existe pas actuellement de consensus sur la technologie qui pourrait permettre la décarbonation du maritime à long terme : il est donc nécessaire de les expérimenter. Citons ainsi, sans souci d'exhaustivité : l'hydrogène, l'ammoniac, le biogaz, le gaz d'origine fossile avec capture et stockage du CO₂, le méthanol, les e-carburants (en particulier le méthane de synthèse)...

Comme le souligne l'exercice de prospective maritime de DNV d'août 2021 ¹⁵, il peut dès lors être intéressant, sinon souhaitable,

14. Il faut néanmoins compter les émissions de CO₂ associées à la fabrication de la batterie.

15. « DNV (Det Norske Veritas) Energy Transition Outlook 2021 - Maritime Forecast to 2050 », *Maritime Cyprus*, 2 septembre 2021. URL : <https://maritimecyprus.com/2021/09/02/dnv-energy-transition-outlook-2021-maritime-forecast-to-2050/>. Consulté le 19 janvier 2023.

pour un armateur qui souhaite éviter le risque d'un investissement inutilisable dans un monde à zéro émission, de s'équiper d'un navire pouvant à terme utiliser un carburant neutre en carbone, ce qui peut conduire à choisir un moteur pouvant fonctionner à moyen terme avec un tel carburant, et à prévoir la possibilité de modifier les capacités de stockage et d'installer les équipements de sécurité nécessaires (en particulier pour l'ammoniac et l'hydrogène).

Le recours aux biocarburants (y compris sous forme de méthanol) peut également présenter de l'intérêt, notamment en période de transition en attendant les solutions totalement décarbonées, car ils permettent, à coût modéré pour certains, de continuer à opérer les navires existants en répondant aux objectifs de l'OMI avant le renouvellement de leurs flottes. Mais, compte tenu de leur relative rareté et des concurrences d'usage associées, il est difficile de considérer, sauf dans quelques cas particuliers comme celui de la pêche hauturière, les biocarburants comme la solution principale à long terme pour le transport maritime — même si la société de classification Lloyd's Register et l'UMAS (University Maritime Advisory Services) soulignent leur intérêt en termes de coût.

*
* *

La technologie ne peut pas, à elle seule, conduire à la neutralité carbone dans le domaine du transport. Néanmoins, les calculs effectués ici montrent qu'elle peut permettre une réduction notable des émissions de gaz à effet de serre : c'est d'ailleurs le sens de la Stratégie de mobilité durable et intelligente publiée par la Commission européenne en décembre 2020, qui insiste sur l'idée que les carburants destinés aux transports doivent devenir neutres en carbone¹⁶. Le développement des technologies neutres en carbone doit donc être résolument mis en œuvre.

Les résultats exposés dans cet article pourraient conduire à envisager de manière optimiste la transition vers la neutralité carbone des transports. Les promesses de décarbonation passées nous incitent à considérer cependant ces chiffres avec beaucoup de prudence. Si nous voulons que cette transition se fasse effectivement, il est nécessaire de mettre en place les leviers économiques qui la rendront possible.

La définition d'une trajectoire de référence du signal-prix carbone pour l'ensemble de l'économie est une boussole nécessaire

16. « Stratégie de mobilité durable et intelligente [...] », *op. cit.*

SIX DÉFIS TECHNOLOGIQUES POUR LA DÉCENNIE 2020-2030

- ▶ Encourager le développement des poids lourds neutres en carbone.
- ▶ Déployer des réseaux de recharge pour les véhicules alternatifs : électriques (tous véhicules), hydrogène pour les poids lourds.
- ▶ Favoriser l'apparition d'aéronefs ultrasobres et développer massivement le biokérosène (y compris le e-kérosène) pour l'aérien.
- ▶ En l'absence de solution unique, expérimenter les techniques permettant une propulsion neutre des navires.
- ▶ Créer les usines permettant la fabrication des transports de demain (véhicules électriques, moteurs électriques, batteries, hydrogène, électrolyseurs...) et accompagner l'évolution des hommes et des territoires amenés à se reconverter.
- ▶ Mener la R&D sur les batteries à électrolyte dit solide et sur les avions à hydrogène (et électriques ou hybrides)... ■

D.A. et A.S.

pour guider l'action des pouvoirs publics et des acteurs privés, avec comme corollaire la nécessité de calculer, dans une approche socio-économique, le coût de la tonne de CO₂ évitée dans les différents projets envisagés, et de privilégier ceux dans lesquels cette valeur est la plus faible. Compte tenu de l'acceptation incertaine par la population de toute taxe nouvelle ou de l'alourdissement des taxes existantes, la transition sera vraisemblablement orchestrée non pas par un seul outil économique traduisant ce signal-prix du carbone dans l'économie, mais par une palette de leviers économiques (et réglementaires), principalement les normes européennes sur les émissions des véhicules et les dates fixant l'interdiction de vente de véhicules neufs émetteurs de gaz à effet de serre, mais aussi l'instauration des ZFE, le bonus-malus, le suramortissement pour les véhicules professionnels, la prime à la casse... L'augmentation de la contribution climat énergie ou la mise en place, comme la Commission européenne le propose, d'un marché de quotas propre aux transports et au chauffage n'est probablement pas indispensable pour atteindre à terme la neutralité carbone du parc, puisque les mesures précédentes devraient mener progressivement à l'interdiction de la vente des véhicules thermiques émetteurs de gaz à effet de serre d'origine fossile. Elle devrait cependant permettre de limiter les émissions durant la phase de transition, et d'accélérer le passage à des véhicules décarbonés : elle rencontrera un degré d'acceptation d'autant plus important que les alternatives au véhicule thermique deviendront

crédibles pour une grande majorité des usages et se seront largement diffusées.

Cette multiplicité de leviers économiques pose le problème de la visibilité (et de la crédibilité) de long terme du signal-prix et nécessite un pilotage fin, d'autant plus difficile que ces leviers seront décidés à des niveaux différents : international (OMI, OACI, convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques), européen, national, local. L'accompagnement industriel de cette transformation et les mesures redistributives à mettre en œuvre constituent bien entendu un élément clef de sa réussite : il faut en prendre conscience et les étudier de façon à en minimiser les effets.

Le maelström qui frappe aujourd'hui les marchés de l'énergie nous ramène à un enseignement majeur de cette prospective : les politiques climatiques, en particulier leurs outils économiques, doivent être régulièrement révisées pour tenir compte de l'évolution du contexte (et débattues afin qu'une majorité de la population les comprenne). Cette évolution « permanente » des politiques peut paraître antinomique avec la crédibilité des signaux-prix de long terme dans l'économie : leur crédibilité repose cependant moins sur leur valeur absolue que sur la détermination des pouvoirs publics à les mettre en œuvre. ■

AIRVORE OU LE MYTHE DES TRANSPORTS PROPRES

À propos du livre de Laurent Castaignède, *Airvore ou le mythe des transports propres. Chronique d'une pollution annoncée*, Montréal : Écosociété, octobre 2022, 424 p.

Édition revue et augmentée d'*Airvore ou la face obscure des transports* (Montréal : Écosociété, 2018), cet ouvrage s'attaque au mythe — très en vogue en cette période d'incitation au basculement vers la voiture électrique — selon lequel les transports motorisés pourraient être propres.

La première partie décrit en détail la genèse des transports motorisés : de la machine à vapeur de Denis Papin jusqu'à leur explosion de 1950 à 2000. De 1950 à 1970, les émissions polluantes des transports passent de la moitié aux trois quarts des pollutions atmosphériques. Les principales émissions polluantes (dans les pays riches) diminueront grâce à la réglementation, de 1980 à 2000, mais en Europe, on observe un maintien persistant de la pollution aux oxydes d'azote (NO_x) et aux particules, lié à un important parc fonctionnant au diesel. C'est aussi dans cette période que la responsabilité humaine des émissions de gaz à effet de serre nocives pour le climat est vérifiée : le premier rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) est publié en 1990. Mais la mobilité mondiale continue de progresser, la flotte de véhicules

routiers double dans le monde entre 2000 et 2020 — essentiellement dans les pays en développement sur cette période.

La mobilité semble obligée de se réinventer face aux morts prématurées dues à la pollution, aux encombrements et aux enjeux climatiques.

Dans la seconde partie, l'auteur montre que dans une perspective de croissance de la mobilité avec un parc mondial qui passerait de 1,1 milliard de véhicules en 2020 à 1,8 milliard en 2040, il n'y a guère d'espoir que la mobilité devienne moins étouffante, plus propre et sobre. La masse moyenne des voitures a continué d'augmenter de 2000 à 2020 avec les SUV¹, particulièrement énergivores, en tête des ventes des constructeurs. Par ailleurs, des mesures récentes montrent que la moitié des particules émises par les véhicules ne seraient pas rejetées par l'échappement mais, entre autres, par les freins et l'usure des pneumatiques. Donc, même sans émissions à l'échappement, avec une voiture électrique, il restera ces particules, les émissions liées aux infrastructures² et les émissions amont liées à la fabrication des véhicules et du carburant. Or, les émissions



1. *Sport Utility Vehicles* : les 4 x 4 urbains.

2. Augmentation de plus de 35 % pendant la décennie 2000 (selon l'Agence internationale de l'énergie), la Chine et l'Inde comptant pour plus de la moitié des surfaces ajoutées.

amont des carburants ne peuvent qu'augmenter avec un pétrole plus complexe à extraire et l'usage de pétroles non conventionnels très polluants. L'électricité est aussi très polluante puisque les centrales thermiques au charbon sont la première source de production électrique³ au monde.

Aussi, une voiture électrique rechargée par la toute dernière génération de centrale thermique au charbon aura des émissions du même ordre que celles des voitures thermiques récentes (Euro 5 ou 6) et si la centrale au charbon est d'ancienne génération, sans réduction des polluants, les émissions indirectes du « carburant » sont alors, selon le type d'émission, 10 à 1 000 fois plus importantes qu'avec une voiture thermique. L'auteur questionne donc la pertinence de substituer tous les véhicules routiers par des versions électriques, en raison non seulement du mode majoritaire de production électrique, mais aussi de la difficulté à produire rapidement des batteries qui exigeront davantage d'extraction minière de métaux déjà accaparés par le stockage électronique. Enfin, l'impact énergétique de la fabrication de batteries pour véhicules n'est rapidement amorti que si les véhicules sont utilisés intensément, à l'instar des véhicules de livraison ou des taxis.

La perspective de la voiture autonome, outre l'augmentation de la

pollution électromagnétique, pourrait démultiplier les trajets individuels en concurrençant les modes doux et les transports en commun, et engendrer plus de congestion et de nouvelles infrastructures ; cela pourrait être la pire erreur technologique de l'histoire automobile. À moins que cette innovation ne se développe comme un service régulé de taxi partagé, dans des villes où la conduite individuelle serait bannie.

Il n'y aura pas de lutte efficace contre le changement climatique (les transports pèsent 30 % des émissions de gaz à effet de serre mondiales) sans brider les émissions du secteur. Or, les progrès offerts par la technologie sont soit marginaux, soit contre-productifs s'ils induisent un effet rebond⁴. En conclusion, l'auteur propose huit ensembles de mesures pour domestiquer le transport motorisé :

1. Afficher en temps réel les vraies émissions des véhicules et immobiliser ceux-ci dès qu'un seuil inadmissible est dépassé. Ces données seraient enregistrées et accessibles aux autorités de contrôle et aux garagistes chargés de l'entretien. Les constructeurs pourraient rester propriétaires des moteurs et de leurs systèmes de dépollution, qui seraient alors loués au client, pour garantir l'évolution des véhicules en cours de vie.

2. Revoir de façon harmonisée, *a minima* à l'échelle européenne, la

3. Part supérieure à 36 % en 2021, en augmentation depuis 2020.

4. Tenant au fait qu'ils conduisent à rouler davantage ou à consommer plus d'énergie dans un autre secteur (exemple du télétravail avec déménagement dans une maison plus éloignée et plus grande à chauffer).

fiscalité sur tous les carburants, de façon à ce que leur prix reflète leurs externalités environnementales. Pour les voitures, l'hybridation serait déployée en limitant l'ampleur de la batterie pour optimiser la consommation et l'émission de polluants. À terme, l'hydrogène vert, le biométhane ou les agrocarburants de deuxième ou troisième génération pourraient devenir les carburants principaux de la mobilité routière ou maritime de longue distance.

3. Limiter le gaspillage en bridant les performances des véhicules (vitesse, masse, gabarit, puissance), voire en limitant automatiquement leur vitesse par géolocalisation. Notons, pour l'aérien, la proposition de réduire les altitudes de vol à 7 000 mètres pour supprimer les traînées de condensation, et baisser la vitesse de vol à 600 km/h, ce qui diminuerait la consommation de carburant d'un quart, et les émissions de moitié.

4. Promouvoir le partage des moyens de transport (auto-partage, covoiturage) par un surcoût à l'auto-solisme⁵ (voies dédiées et péages). Les routes pourraient être uniquement financées par les voitures et camions, pour que les collectivités publiques ne financent plus que les modes doux et les transports en commun. Les usagers occasionnels pourraient disposer d'une exemption annuelle forfaitaire et le transport domicile-travail serait pris en charge par l'employeur.

5. Faire le *marketing* de la sobriété, par exemple en revisitant les objectifs des compétitions de sports mécaniques et les centrant sur la dextérité des pilotes à réduire leur consommation de carburant ou sur la façon de gérer une autonomie limitée. Plus radicalement, interdire la promotion de moyens de transport énergivores ou particulièrement polluants.

6. Simplement limiter le parc motorisé par un contingentement au niveau mondial, afin de forcer les constructeurs à se focaliser sur un renouvellement durable du parc.

7. Sanctuariser les réserves mondiales restantes de charbon, pétrole et gaz, en les inscrivant au patrimoine mondial de l'humanité ou, en alternative, instaurer une taxe carbone à la source de ces réserves pour brider l'offre de fossiles.

8. Judiciariser l'écocide. L'indépendance de la justice vis-à-vis du pouvoir exécutif, dans les démocraties, peut permettre de contrer les *lobbies* industriels comme dernier rempart.

Nombre de propositions de l'auteur interrogent sur la faisabilité de leur mise en œuvre. Le point crucial de l'ouvrage est que sans sobriété et rationalisation de l'usage des transports, ceux-ci par leur nature discrète, à la pollution invisible — pollution nocive pour l'homme et gaz à effet de serre nocifs pour le climat —, pourraient bien manger notre air. ■

Véronique Lamblin

5. Déplacement en voiture d'une seule personne (le conducteur).

DEVENEZ MEMBRE PARTENAIRE DE FUTURIBLES INTERNATIONAL ET ACCÉDEZ À DES CONTENUS EXCLUSIFS

PARUTIONS RÉCENTES

- ▶ « Les sols au défi de la transition écologique », par Jean Haëntjens, *Analyse prospective*, n° 282, 31 janvier 2023, 12 p.
- ▶ « Les paradoxes de l'engagement de neutralité carbone de la Chine », par Stéphanie Monjon, *Analyse prospective*, n° 281, 13 décembre 2022, 19 p.
- ▶ « Le calcul haute performance : éclairage sur un domaine stratégique des années à venir », par Jean-François Soupizet, *Analyse prospective*, n° 280, 24 novembre 2022, 12 p.
- ▶ « Guerre en Ukraine : la dissuasion nucléaire sous tension ? », par Antoine Le Bec, *Analyse prospective*, n° 279, 15 novembre 2022, 9 p.
- ▶ « Les perspectives d'évolution de la fiscalité des entreprises », par François Ecalle, *Analyse prospective*, n° 278, 10 novembre 2022, 13 p.
- ▶ « Le modèle économique chinois en 2034. Nouvel alliage entre forces de marché et dirigisme étatique ? », par François Chimits, *Analyse prospective*, n° 277, 25 octobre 2022, 17 p.
- ▶ « Local, vous avez dit local ? », par Véronique Lamblin, *Analyse prospective*, n° 276, 7 octobre 2022, 9 p.
- ▶ « Métavers et *mirror world* : vers la numérisation du monde ? », par Timothée Silvestre, *Analyse prospective*, n° 275, 20 septembre 2022, 18 p.



Futuribles International est un centre de réflexion sur l'avenir. Ses travaux visent à comprendre les grandes transformations en cours. Ils intègrent la dimension du temps long en insistant sur les marges de manœuvre des acteurs et les stratégies possibles.

Adhésions - informations : Aude Houguenague • Tél. : + 33 (0)1 53 63 37 73 • ahouguenague@futuribles.com
<https://www.futuribles.com/qui-sommes-nous/association-futuribles/presentation/>

Les nouvelles routes de la soie, dix ans après

Par *Barthélémy Courmont*¹, *Frédéric Lasserre*² et *Éric Mottet*³

Quelques mois après la reconduction pour cinq ans de Xi Jinping à la tête du parti communiste chinois, et alors que les tensions diplomatiques se multiplient sur la scène mondiale dans un contexte de crises multiples (Covid, guerre en Ukraine, énergie...), où en est la grande initiative de développement lancée par Pékin en 2013 ? Il y a 10 ans, en effet, un ambitieux projet d'investissement dans les infrastructures de nombreux pays, la Belt & Road Initiative (BRI) ou « nouvelles routes de la soie », était lancé. Un long article de Rémi Perelman, en 2018, en avait présenté la genèse, la teneur et les objectifs divers de la Chine dans nos colonnes⁴.

Barthélémy Courmont, Frédéric Lasserre et Éric Mottet prolongent cette analyse. Ils font ici le point sur cette BRI au caractère multi-forme, qui a permis à Pékin de nouer diverses alliances économiques et stratégiques, et de changer substantiellement les équilibres géopolitiques dans les régions concernées (Asie centrale, Europe, Afrique, etc.) mais dont les objectifs initiaux, très ambitieux, évoluent en raison du ralentissement économique et d'une perception parfois négative de cette initiative. Les auteurs soulignent aussi l'émergence de projets alternatifs lancés par d'autres pays (États-Unis, Japon, Union européenne...), visant à concurrencer la BRI, et le souci de Pékin d'adapter son projet par souci de crédibilité : une BRI 2.0 se met ainsi en place. Indispensable à la Chine, dont l'économie est devenue très dépendante du reste du monde, cette BRI 2.0 devra, pour réussir dans la durée, faire face à une concurrence plus rude et éviter de renvoyer une image trop hégémonique auprès de ses partenaires. S.D.

1. Professeur à l'université catholique de Lille et responsable pédagogique du *master Histoire / relations internationales* ; directeur de recherche à l'IRIS (Institut de relations internationales et stratégiques) et responsable du programme Asie-Pacifique ; codirecteur de l'ouvrage *À la croisée des nouvelles routes de la soie*, Québec : Presses universitaires du Québec, 2022.

2. Professeur à l'université Laval de Québec et directeur du Conseil québécois d'études géopolitiques (CQEG) ; codirecteur de l'ouvrage *À la croisée des nouvelles routes de la soie*, *op. cit.*

3. Professeur à l'université catholique de Lille et directeur de la Chaire de recherche en mondes émergents (CREME) ; codirecteur de l'Observatoire géopolitique de l'Indo-Pacifique à l'IRIS ; codirecteur de l'ouvrage *À la croisée des nouvelles routes de la soie*, *op. cit.*

4. PERELMAN Rémi, « Les nouvelles routes de la soie. Sur la nature des ambitions chinoises », *Futuribles*, n° 425, juillet-août 2018, p. 69-99.

Le projet chinois des nouvelles routes de la soie, formellement lancé en 2013 à l'occasion d'une visite officielle de Xi Jinping au Kazakhstan, n'a laissé au cours de la dernière décennie aucun gouvernement ou observateur indifférent. Perçu comme une menace à un ordre établi ou à leurs intérêts par certaines puissances, dont les États-Unis, l'Inde ou le Japon, ou comme une occasion de développement ou d'émancipation d'une certaine tutelle occidentale par d'autres, ce projet s'inscrit dans la durée et a déjà conduit à des transformations majeures du paysage économique, politique et diplomatique en Asie, et même au-delà. On relève ainsi des mutations économiques, politiques et géopolitiques au Moyen-Orient, en Afrique ou en Amérique latine qui sont liées de près ou de loin à ce qui peut être assimilé à une nouvelle grammaire des relations internationales. Une décennie après le lancement de l'initiative chinoise connue sous le nom générique de *Belt & Road Initiative* (BRI, Initiative de la ceinture et de la route en français), comment interpréter la portée de ces transformations ? Le déploiement de ces « nouvelles routes de la soie », qui désignent la BRI, a-t-il abouti à des bouleversements significatifs de l'ordre régional et international ?

Les difficultés que rencontre actuellement la Chine, caractérisées par une baisse significative de sa croissance économique (conséquence d'une baisse de la croissance mondiale, et d'une stratégie de zéro Covid soumise à de nombreuses critiques et porteuse d'incertitudes quant à la capacité de réouverture complète du pays) ou encore par une image contestée sur la scène internationale, signifient-elles la fin de la BRI ? Si des réajustements sont en cours, et l'étaient même déjà avant la pandémie, il serait erroné de considérer que Pékin puisse abandonner son projet de mettre en place une nouvelle mondialisation dont il serait le principal acteur. Ainsi, plutôt que faire mention de la fin programmée de la BRI, il nous semble plus approprié de mettre en relief une BRI 2.0, adaptée aux contraintes internes et externes que rencontre la Chine, au niveau tant économique que géopolitique.

Entre projets pharaoniques et partenariats sous forme de prêts

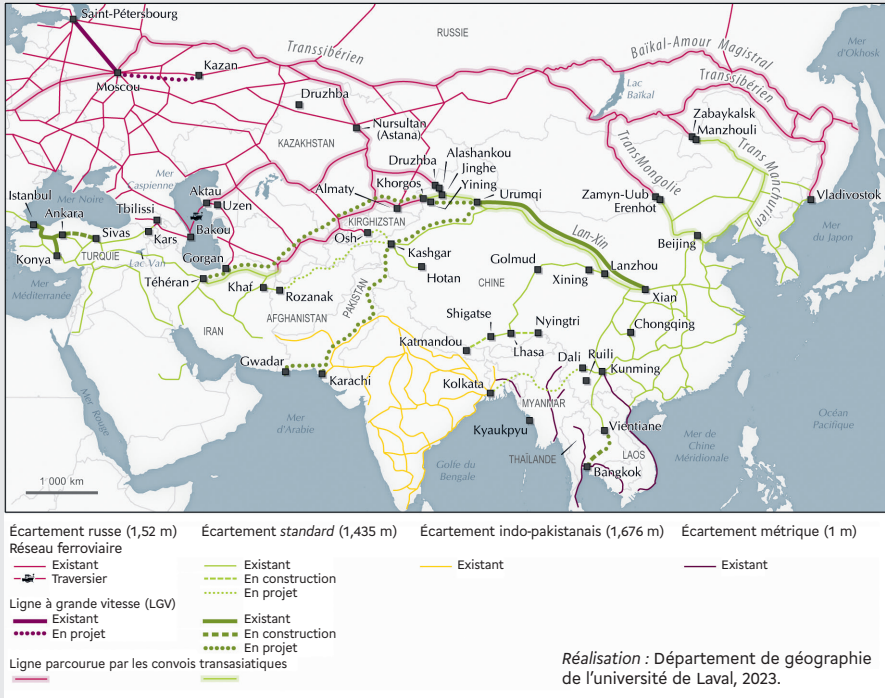
Les observateurs et les médias accordent une attention toute particulière au volet des infrastructures des nouvelles routes de la soie, mettant l'accent sur le caractère pharaonique des projets portés par Pékin. La Chine investirait ainsi des sommes considé-

rables — 932 milliards de dollars US depuis 2013 selon le *think-tank* Green Finance & Development Center de l'université de Fudan (Shanghai) — dans la construction ou la modernisation de nouvelles infrastructures de transport, voies ferrées, routes, ports, oléoducs et gazoducs en Asie, au Moyen-Orient, en Europe et en Afrique, et même en Amérique latine. Or la Chine, ou plus exactement ses entreprises, investit rarement, sauf dans certains projets ciblés tels des ports comme c'est le cas depuis deux décennies. Longtemps considérée comme un unique pays d'accueil, la Chine est même désormais exportatrice nette d'investissements directs à l'étranger (IDE) — depuis 2014. Les flux sortants sont ainsi passés de 7 à plus de 180 milliards de dollars US entre 2001 et 2016. Mais les grands projets des nouvelles routes de la soie sont le plus souvent l'objet de prêts de la part de banques d'affaires chinoises ou de la Banque asiatique d'investissement dans les infrastructures (BAII), levier financier créé par la Chine en 2014, qui compte désormais 86 membres, dont de nombreux partenaires asiatiques et européens.

Cette réalité implique que la Chine ne devient pas propriétaire des infrastructures ainsi construites, et refuse parfois de le devenir. En témoigne le projet de voie ferrée à travers le Kirghizistan, dont la rentabilité douteuse incite le gouvernement kirghiz à insister auprès de Pékin pour qu'il soit payé par la Chine, ce que celle-ci refuse alors qu'elle serait le premier bénéficiaire d'une voie qui dessert mal ce pays enclavé. En revanche, certains projets majeurs supposent l'endettement des pays partenaires, à travers des prêts dont les conditions demeurent souvent opaques, ce qui alimente l'idée du « piège de la dette », selon laquelle la Chine inciterait délibérément les pays partenaires à s'endetter pour devenir dépendants de Pékin, voire être forcés de lui concéder des actifs et des infrastructures en échange d'une restructuration de leur dette.

Au-delà de cette controverse qui se vérifie plus ou moins selon les cas, les infrastructures de transport demeurent une dimension importante des nouvelles routes de la soie. S'appuyant parfois sur des infrastructures existantes comme le Transsibérien ou plusieurs ports le long de la route maritime classique de la Méditerranée à la mer de Chine méridionale, la BRI implique parfois la construction de nouveaux équipements, en Asie du Sud-Est à travers le Laos notamment (voie ferrée rapide inaugurée en décembre 2021) ; à travers les montagnes du Kirghizistan, un projet qui se heurte à de nombreuses difficultés économiques et techniques, et pour lequel Bichkek tente de résister à la pression chinoise ; ou encore à travers de nombreux ports que des entreprises chinoises modernisent

Carte 1. Quelques projets ferroviaires inclus dans la BRI (2021)



parfois de fond en comble ou construisent, comme Hambantota (Sri Lanka), Djibouti, Gwadar (Pakistan), Le Pirée (Grèce), Rotterdam (Pays-Bas) ou Hambourg (Allemagne). Avec les corridors terrestres symbolisés par les voies ferrées, la Chine se relie aux pays de son voisinage et au-delà ; et avec les infrastructures portuaires, ce sont les voies d'accès maritimes qui sont l'objet d'une forte attention.

Mais la BRI, ce ne sont pas que des infrastructures de transport, ce sont aussi des projets dans les domaines de la finance (avec des échanges en yuans en remplacement du dollar US), de la santé (comme l'a illustré la diplomatie du masque engagée par Pékin au début de la pandémie de Covid-19) ou encore du numérique. La circulation des données de la « datasphère » constitue de son côté un enjeu économique majeur dans le cadre des nouvelles routes de la soie. Huawei, multinationale chinoise dans le domaine de la téléphonie et de l'Internet, est ainsi devenu un champion industriel chinois de la 5G, mais un champion controversé, objet de craintes et de préoccupations de sécurité, en particulier dans le monde occidental.

Des ambitions trop grandes ?

Depuis son lancement, la BRI se distingue par la flexibilité de la labellisation des projets, tout comme par son immense portée, avec un volume total se comptant en plusieurs milliers de milliards de dollars US. Alors que la BRI a pu évoluer rapidement en englobant différents projets et pays, la prolifération précipitée de projets étiquetés BRI s'est cependant révélée difficile à gérer par la suite. Une source officielle chinoise évoque un total de 3 116 projets à la fin de 2018⁵. Les gouvernements, les entreprises, les banques et les promoteurs, tant chinois qu'étrangers, ont généreusement mobilisé le label BRI comme un terme à la mode en matière de relations publiques, y compris dans de nombreux projets déjà en cours au moment du lancement de l'initiative en 2013.

Selon de nombreux observateurs, la vocation des nouvelles routes de la soie est économique mais aussi politique, ce qui en fait un projet plus ambitieux. Il s'agissait de relancer le développement de l'ouest et du centre du pays, d'accélérer la transition de l'économie chinoise de la sous-traitance et de la production manufacturière à haute intensité de main-d'œuvre, vers une économie plus moderne, axée sur les services et la haute technologie, résolument engagée dans la mondialisation⁶. Le développement des services de transport et des infrastructures routières, ferroviaires, énergétiques et portuaires, qui ne sont, rappelons-le, qu'un des aspects, quoique très visible, des nouvelles routes de la soie, est plus vraisemblablement un instrument au service des objectifs à terme de la Chine qu'un but en soi de la stratégie chinoise. En effet, la politique des nouvelles routes de la soie nous semble graviter autour de trois objectifs :

► Assurer la stabilité de la République populaire de Chine. Cela passe par le développement économique intérieur, l'aménagement et le rééquilibrage du territoire chinois (les provinces enclavées dans l'ouest du pays en particulier), la maîtrise des tentations séparatistes

5. STATE COUNCIL, 央企承建“一带一路”项目3116个 [Les entreprises chinoises impliquées dans la construction de 3 116 projets BRI], 31 octobre 2018. URL : http://www.gov.cn/xinwen/2018-10/31/content_5336052.htm. Consulté le 13 janvier 2023. Une autre source fait état de 2 631 projets en mai 2019 : BRI Connect: An Initiative in Numbers, Refinitiv, 2019. URL : https://www.refinitiv.com/content/dam/marketing/en_us/documents/reports/refinitiv-zawya-belt-and-road-initiative-report-2019.pdf. Consulté le 13 janvier 2023. Témoin d'une certaine opacité ou de la difficulté de colliger des données sur un programme polymorphe et pas nécessairement très coordonné, le site officiel Belt and Road Portal (<https://eng.yidaiyilu.gov.cn/>) affiche des données souvent anciennes et aucun chiffre ne permettant de prendre la mesure du nombre de projets.

6. YE Min, *The Belt Road and Beyond: State-Mobilized Globalization in China: 1998-2018*, Cambridge : Cambridge University Press, 2020.

du Xinjiang et la création de nouveaux débouchés économiques pour une économie chinoise affectée par des surcapacités. La croissance économique et la distribution de la richesse sont la clef de la stabilité de la société et de la légitimité de son parti dirigeant.

► Sécuriser les frontières, l'environnement régional et les approvisionnements en matières premières, en particulier en offrant une alternative au détroit de Malacca, par lequel passe l'essentiel de l'approvisionnement chinois en pétrole et perçu comme source de vulnérabilité par la Chine.

► Enfin, proposer une alternative à l'ordre mondial, hérité de Bretton Woods, sur les plans commercial et financier notamment. La Chine apparaît de plus en plus comme désireuse d'infléchir les normes internationales, voire de formuler de nouvelles normes⁷. La création de la BAI est apparue comme un instrument financier visant à permettre l'émancipation d'un système international perçu comme trop américano-centré. Une nouvelle étape a été franchie début 2018, avec la décision de créer très rapidement un marché domestique pour la négociation des contrats à terme sur le pétrole brut libellés en yuans chinois et convertibles en or, dans les Bourses de Shanghai et de Hong Kong. La Russie, l'Iran, le Qatar et le Venezuela acceptent désormais de vendre leur pétrole avec des contrats en yuans convertibles en or⁸. La guerre en Ukraine et les conséquences économiques et sociales de la pandémie mondiale de Covid-19 pourraient accélérer ce phénomène.

Le caractère multiforme des objectifs contenus dans la BRI confirme les ambitions de Pékin, mais aussi la difficulté à les concrétiser. Non seulement le contexte géopolitique et économique international ne plaide pas en faveur d'un succès d'initiatives dépassant le simple cadre d'investissements dans les infrastructures, mais en plus, l'image de la BRI peut souffrir d'une perception négative associée à un risque d'hégémonie et / ou de piège de la dette dans les pays récipiendaires.

7. LANTEIGNE Marc, « 'Have You Entered the Storehouses of the Snow?' China as a Norm Entrepreneur in the Arctic », *Polar Record*, vol. 53, n° 2, mars 2017, p. 117-130. URL : <https://doi.org/10.1017/S0032247416000759>. Consulté le 13 janvier 2023 ; MOTTET Éric, *La Puissance décomplexée de la Chine*, Montréal : Les Presses de l'université de Montréal, 2020 ; LINCOT Emmanuel et VÉRON Emmanuel, *La Chine face au monde : une puissance résistible*, Paris : éd. Capit Muscas, 2021 ; RADU Roxana et alii, « Normfare: Norm Entrepreneurship in Internet Governance », *Telecommunications Policy*, vol. 45, n° 6, juillet 2021, art. 102148. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308596121000525>. Consulté le 13 janvier 2023.

8. ALLIZARD Pascal et JOURDA Gisèle, *Pour la France, les nouvelles routes de la soie : simple label économique ou nouvel ordre mondial ?*, Paris : Sénat, rapport d'information de la Commission des affaires étrangères, de la défense et des forces armées, n° 520, mai 2018. URL : <https://www.senat.fr/rap/r17-520/r17-5201.pdf>. Consulté le 13 janvier 2023.

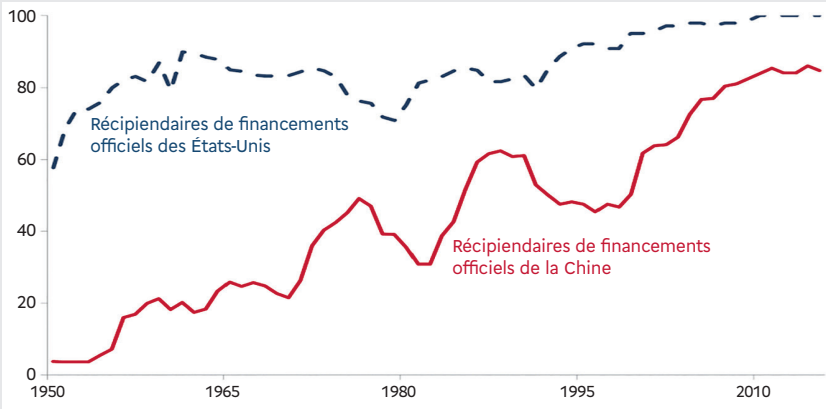
Entre piège de la dette et projets alternatifs

Les nouvelles routes de la soie connaissent des succès, comme en témoignent la collaboration étroite entre les gouvernements chinois et pakistanais, et l'avancement de plusieurs projets de modernisation des infrastructures domestiques, même si l'état très dégradé des infrastructures ferroviaires et l'opposition politique de l'Inde rendent illusoire un projet phare du corridor Chine-Pakistan, à savoir la construction d'une voie ferrée entre Kashgar au Xinjiang et Islamabad. L'Inde demeure très réticente à s'engager dans un programme qui bouscule sa perception de l'ordre régional et comporterait de nombreux éléments de menace, comme la construction d'un réseau de ports à vocation commerciale et militaire, le « collier de perles » qui viserait selon New Delhi à la menacer dans l'océan Indien. Dans le Caucase, les projets cheminent lentement, tandis qu'en Asie du Sud-Est, les perceptions de la BRI sont contrastées, au-delà des occasions d'affaires qu'aucun gouvernement ne veut ignorer, selon des grilles de lecture qui reflètent assez largement les préoccupations géopolitiques des États de l'Association des nations de l'Asie du Sud-Est (ASEAN).

Que ce soit dans le Caucase, en Asie du Sud-Est, dans le sous-continent indien ou au-delà, l'ampleur des prêts consentis par la Chine, et l'intensité de son activisme économique et diplomatique viennent bousculer les ordres régionaux. Certains tentent d'en tirer parti, comme la Turquie ou l'Iran, en proposant des services de transport à travers leurs territoires, surtout à la faveur de la guerre en Ukraine qui se traduit notamment par une baisse majeure des convois ferroviaires transitant par la Russie. D'autres s'en inquiètent : l'Inde et le Japon, on l'a vu, mais aussi l'Union européenne ou les États-Unis. Afin de ne pas laisser le champ libre à la Chine, les États-Unis, le Japon et les autres pays du G7 souhaitent jouer le même jeu que Pékin en débloquant plus de 600 milliards de dollars US pour construire des infrastructures en Amérique latine, en Afrique et dans la région indopacifique.

Le président américain Joe Biden et ses homologues du G7 ont annoncé en juin 2021 l'initiative *Build Back Better World* (B3W ou Reconstruire le monde en mieux), lors du sommet du G7 de 2021 au Royaume-Uni. Cette initiative vise à financer la construction d'infrastructures dans les pays en développement qui ont été particulièrement affectés par la pandémie de Covid-19. La B3W fait suite à d'autres initiatives comme le *Global Gateway* (2021-2027) de l'Union

Graphique 1. Portée mondiale des prêts directs officiels de la Chine vs. États-Unis (en %*)



*Calcul basé sur la part des pays en développement et émergents ayant reçu des fonds publics chinois ou américains au cours des cinq dernières années.

Source : HORN Sebastian, REINHART Carmen M. et TREBESCH Christoph, « China's Overseas Lending », *op. cit.*

européenne, doté de 300 milliards d'euros⁹ ; ou le Partenariat pour des infrastructures de qualité lancé en 2015 par le Japon, avec la Banque asiatique de développement (BAD), doté de 110 milliards de dollars US et dont il est le premier investisseur ; ou encore le Blue Dot Network, un organisme de certification lancé en 2019 par l'Australie, le Japon et les États-Unis dans le but de promouvoir et de mobiliser des financements dans des infrastructures dites de qualité, par opposition implicite à des projets chinois, construits rapidement et souvent dépeints comme de moindre qualité par les concurrents occidentaux ou japonais¹⁰. Ces prêts, à taux souvent inférieurs aux taux chinois¹¹, et cette aide seront-ils cependant suffisants pour contrer l'influence croissante de la Chine en Eurasie comme en Afrique, où les offres de financement de Pékin permettent aussi aux États africains de disposer d'un levier de négociation dans leur face-à-face avec leurs anciens tuteurs coloniaux ou créanciers occidentaux ?

9. COMMISSION EUROPÉENNE, « Global Gateway: Up to €300 Billion for the European Union's Strategy to Boost Sustainable Links around the World », communiqué de presse, 1^{er} décembre 2021. URL : https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_6433. Consulté le 13 janvier 2023.

10. YOSHIMATSU Hidetaka, « Japan's Strategic Response to China's Geo-economic Presence: Quality Infrastructure as a Diplomatic Tool », *The Pacific Review*, vol. 36, n° 1, 2023, p. 148-176.

11. HORN Sebastian, REINHART Carmen M. et TREBESCH Christoph, « China's Overseas Lending », *Journal of International Economics*, vol. 133, novembre 2021, art. 103539. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022199621001197> ; PAIRAULT Thierry, « L'Afrique et sa dette "chinoise" au temps de la Covid-19 », *Revue de la régulation. Capitalisme, institutions, pouvoirs*, vol. 29, 2021. URL : <https://doi.org/10.4000/regulation.17645>. Consulté le 16 janvier 2023.

Les Occidentaux misent sur des offres de financement plus transparentes (en vertu des critères du Club de Paris de l'OCDE, l'Organisation de coopération et de développement économiques), mais il pourrait se révéler ardu de concurrencer l'offre financière chinoise, abondante jusqu'à un récent resserrement du crédit, rapidement disponible y compris pour des États endettés ou ne répondant pas aux critères du Fonds monétaire international¹², sans conditionnalité politique et, surtout, moins critiques envers des projets de rentabilité discutable¹³. Il se peut que le temps passant, certains pays ciblés par la Chine découvrent les limites de la coopération économique, ou prennent la mesure des illusions qu'eux-mêmes entretenaient à ce sujet, notamment en Europe centrale et orientale, où le désenchantement à l'égard des nouvelles routes de la soie tient autant au faible niveau d'investissement de la Chine qu'aux espoirs irréalistes que nourrissaient un certain nombre de ces États¹⁴. Mais la Chine a indiscutablement pris de l'avance avec ses projets.

C'est également sur le plan diplomatique que plusieurs États cherchent à contrer la BRI. L'Union européenne craint ainsi que les appels d'offres lancés par la Chine pour construire routes, gares et ports excluent leurs entreprises et se fassent au profit des seules entreprises chinoises, tout en accroissant l'influence politique de la Chine, devenue aux yeux de plusieurs États européens un partenaire important certes, mais aussi un concurrent économique et même un « rival systémique¹⁵ ». Outre l'attrait que peut représenter le marché chinois et son levier financier, il est loin d'être évident que la Chine demeure très attractive pour longtemps.

12. MASS Todd et ROSE Sarah, « China Exim Bank and Africa: New Lending, New Challenges », *Center for Global Development Notes*, novembre 2006. URL : https://www.files.ethz.ch/isn/38231/2006_11_06.pdf. Consulté le 16 janvier 2023 ; et HORN Sebastian, REINHART Carmen M. et TREBESCH Christoph, *op. cit.*

13. KRATZ Agatha et PAVLICEVIC Dragan, *China's High-speed Rail Diplomacy: Riding a Gravy Train?*, Londres : King's College (*Lau China Institute Working Paper Series*), 2016 ; et KER Michelle, « China's High-speed Rail Diplomacy », Washington, D.C. : U.S.-China Economic and Security Review Commission, *Staff Research Report*, février 2017. URL : [https://www.uscc.gov/sites/default/files/Research/China%27s High Speed Rail Diplomacy.pdf](https://www.uscc.gov/sites/default/files/Research/China%27s%20High%20Speed%20Rail%20Diplomacy.pdf). Consulté le 16 janvier 2023.

14. TURCSÁNYI Richard Q., « China and the Frustrated Region: Central and Eastern Europe's Repeating Troubles with Great Powers », *China Report*, vol. 56, n° 1, février 2020, p. 60-77, Institute of Chinese Studies (Delhi) ; et KAVALSKI Emilian, « The End of China's Romance with Central and Eastern Europe », *Global Media and China*, vol. 6, n° 1, mars 2021, p. 77-99. URL : <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/2059436421994442>. Consulté le 16 janvier 2023.

15. HAUTE REPRÉSENTANTE DE L'UNION POUR LES AFFAIRES ÉTRANGÈRES ET LA POLITIQUE DE SÉCURITÉ, « Communication conjointe au Parlement Européen, au Conseil européen et au Conseil sur les relations UE-Chine. Une vision stratégique », Commission européenne, JOIN(2019)5 final, 12 mars 2019. URL : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:52019JC0005&from=FR>. Consulté le 16 janvier 2023.

Les États-Unis sont également très méfiants vis-à-vis de l'ensemble du programme des nouvelles routes de la soie. Washington s'inquiète de savoir si, derrière le projet économique, ce n'est pas un nouveau système multilatéral mondial que la Chine tenterait de mettre en place, au détriment de l'influence américaine. L'Accord de partenariat transpacifique, également connu sous le nom de Partenariat transpacifique, fut ainsi lancé en 2016 comme tentative de rapprocher certains pays d'Asie des États-Unis et de contrer l'influence chinoise — approche abandonnée par le président Trump en 2017. Mais on voit que depuis son arrivée au pouvoir en janvier 2021, Joe Biden cherche à renouer une relation étroite avec les partenaires traditionnels de Washington en Asie-Pacifique, et a fait de l'Indo-Pacifique la priorité de la politique étrangère des États-Unis, comme pour mieux contrer Pékin.

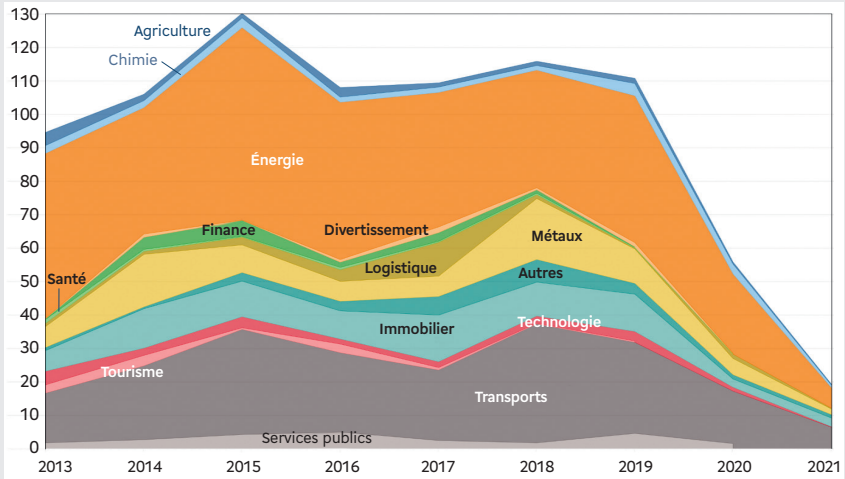
Enfin, d'autres pays cherchent à nouer des alliances pour contrer le projet chinois. Le corridor de croissance Asie-Afrique ou AAGC (*Asia-Africa Growth Corridor*) est ainsi un accord de coopération économique entre les gouvernements de l'Inde, du Japon et de plusieurs pays africains, qui s'est négocié sans Pékin. De même, le corridor Nord-Sud qui rassemble la Russie, l'Iran et l'Inde, est un outil géoéconomique destiné, aux yeux de New Dehli, à contrer la Chine sur le terrain des corridors de développement.

Une BRI 2.0 pour réajuster les projets existants ?

Les nouvelles routes de la soie sont l'objet de critiques en interne, de la part de ceux qui se plaignent d'un trop faible retour sur investissement, mais aussi sur la scène internationale, de ceux qui craignent une hégémonie chinoise et de ceux qui s'inquiètent des déséquilibres provoqués par ces investissements massifs. Des ajustements de la BRI sont en cours, témoignant du souci de la Chine de chercher à s'adapter aux contraintes économiques, sociales et politiques, consistant à prioriser certains projets, au détriment d'autres peu rentables et mal acceptés.

Un certain nombre de projets problématiques, la gouvernance financière de l'initiative et le décalage entre les attentes en matière de développement et la concrétisation de celui-ci, ont conduit à ternir l'image de la BRI dans certaines parties d'Asie, d'Afrique ou en Europe de l'Est. Ce risque envers la crédibilité et la réputation de l'initiative a poussé Pékin à promettre plus de clarté et une amélioration de la gouvernance des projets, en particulier sur certaines questions comme les prêts, la dette des pays partenaires

Graphique 2. Engagements financiers de la Chine dans la BRI par secteurs, de 2013 à mi-2021 (en milliards de dollars US)



Source : NEDOPIL WANG Christoph, « China Belt and Road Initiative (BRI) Investment Report H1 2021 », Green Finance & Development Center, 27 juillet 2021. URL : <https://greenfdc.org/china-belt-and-road-initiative-bri-investment-report-h1-2021/>. Consulté le 19 janvier 2023.

et la durabilité environnementale. Le gouvernement chinois a ainsi communiqué aux banques chinoises des directives pour orienter les décisions d'octroi des prêts, à toutes fins utiles, leur enjoignant de resserrer les conditions de financement ¹⁶. Nous assistons ainsi à la mise en place d'une sorte de BRI 2.0, plus sélective et plus contrôlée, afin d'éviter les échecs et les critiques, tant en interne que dans les pays récipiendaires.

La Chine est sensible aux critiques formulées à l'endroit des nouvelles routes de la soie. Celles-ci, accusées de constituer un cheval de Troie pour l'influence politique chinoise, de tendre un « piège de la dette », de favoriser les entreprises chinoises à travers des contrats opaques, suscitent en effet, depuis leur lancement en 2013, craintes et reproches. Certains sont fondés sur la peur de voir la Chine bousculer un certain ordre international ; d'autres, sur les retombées économiques très mitigées d'un programme pourtant

16. PEPE Zhang, « Belt and Road in Latin America: A Regional Game Changer? », *Issue Brief*, 8 octobre 2019, Atlantic Council. URL : <https://www.atlanticcouncil.org/in-depth-research-reports/issue-brief/belt-and-road-in-latin-america-a-regional-game-changer/> ; LIAO Jessica C., « How BRI Debt Puts China at Risk », *The Diplomat*, 27 octobre 2021. URL : <https://thediplomat.com/2021/10/how-bri-debt-puts-china-at-risk/> ; MINGEY Matthew et KRATZ Agatha, « China's Belt and Road: Down but not Out », Rhodium Group, 4 janvier 2021. URL : <https://rhg.com/research/bri-down-out/> ; et SWEET Rod, « Investment Slows as China Tightens its Belt & Road Initiative », *Global Construction Review*, 22 novembre 2021. URL : <https://www.globalconstructionreview.com/investment-slows-as-china-tightens-its-belt-road-initiative/>. Consultés le 16 janvier 2023.

qualifié par Pékin de gagnant-gagnant ; d'autres enfin, sur des finalités mal intentionnées prêtées à la Chine, sans pour le moment d'élément tangible pour le démontrer, comme la volonté supposée de Pékin de se saisir d'actifs stratégiques ou de constituer peu à peu un réseau de ports à vocation civile et militaire pour encercler l'Inde. La question de la réciprocité est aussi au cœur des réserves que manifestent de nombreux pays à l'égard des projets chinois. On se souvient notamment des propos d'Emmanuel Macron, alors en visite officielle en Chine, à ce sujet en janvier 2018 : « ces routes sont toujours en partage. [...] Elles ne peuvent être univoques. [...] Mais ces routes de la soie ne pourront pleinement être une réussite que si elles parviennent à créer des coopérations équilibrées. [...] Elles ne peuvent être les routes d'une nouvelle hégémonie qui viendraient en quelque sorte mettre en état de vassalité les pays qu'elles traversent ¹⁷. » Un appel à la prudence qui ne peut laisser insensible ni les dirigeants chinois, ni les pays intéressés par l'offre de Pékin mais qui sont dans le même temps inquiets de basculer dans une néovassalité.



Personne ne peut nier que les nouvelles routes de la soie ont un profond impact géopolitique : en redessinant la carte des relations commerciales, en favorisant des relations économiques et politiques plus étroites entre la Chine et ses partenaires, en diffusant les normes industrielles chinoises, en bâtissant des liens plus directs entre la Chine et ses voisins à travers ports, routes, voies ferrées, câbles de télécommunication, réseaux Internet, Pékin exerce un pouvoir d'attraction, non pas irrésistible mais réel, sur son voisinage proche mais aussi plus lointain, et cela module les relations politiques et les dynamiques géoéconomiques. Mais on ne peut tirer aucune conclusion de ce constat quant au caractère inéluctable et prémédité d'un plan de domination chinoise à travers les nouvelles routes de la soie, quand bien même la Chine ne cache pas qu'elle aspire à devenir la première puissance mondiale à l'horizon 2049, année du centenaire de l'accession au pouvoir du parti communiste. L'outil des nouvelles routes de la soie n'est pas forcément l'instrument de ce projet, même s'il peut contribuer à asseoir le rayonnement et l'influence de la Chine.

17. Transcription du discours du président de la République, Emmanuel Macron, au palais de Daminggong, le 9 janvier 2018. URL : <https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/2018/01/09/transcription-du-discours-du-president-de-la-republique-au-palais-de-daminggong>. Consulté le 16 janvier 2023.

Du fait de l'ampleur des sommes prêtées par ses banques d'affaires, d'infrastructures de transport en développement et de services logistiques modernisés ; d'un intense engagement diplomatique dans de grandes conférences de coopération à vocation économique parfois plus anciennes que la BRI, mais relancées après 2013, comme le sommet Chine-Europe centrale et orientale 17 + 1 (devenu 16 + 1 depuis la défection de la Lituanie en 2021), ou encore le Forum sur la coopération sino-africaine (depuis 2000) ; et de l'émergence d'acteurs économiques majeurs (tels Cosco, Hutchison, China Merchants, CNPC / China National Petroleum Corporation, Sinopec, ZTE / Zhongxing Telecommunication Equipment Company, Huawei), les nouvelles routes de la soie sont sans doute appelées à marquer la scène internationale sur le moyen terme. Imprimeront-elles une redéfinition de l'ordre des normes et de la gouvernance internationale que la Chine appelle de ses vœux ? Ou seront-elles rapidement connotées comme un instrument de promotion économique porté par la Chine, sur lequel nombre de pays posent un regard pragmatique car porteur de leviers possibles de croissance, mais aussi critique et détaché des hyperboles rhétoriques et des promesses de développement accéléré, comme on l'observe notamment en Europe ¹⁸ ?

Fortement intégrée à l'économie mondiale, la Chine n'a pas d'autre choix que de poursuivre ses investissements massifs en vue d'assurer sa croissance et d'ouvrir de nouveaux marchés. Ainsi, en dépit des effets de la pandémie de la Covid-19 et des problèmes rencontrés dans plusieurs pays récipiendaires des investissements chinois, la BRI s'imposera dans la durée, avec des projets remaniés et parfois corrigés, une concurrence plus âpre, mais une dynamique qui n'a pas vocation à s'arrêter. ■

18. CLAVERIE Benjamin, « La Belt and Road Initiative : l'Europe, terminus du "rêve chinois" ? », *Revue internationale et stratégique*, n° 116, hiver 2019, p. 21-32.

SESSIONS DE FORMATION FUTURIBLES

VEILLE | PROSPECTIVE | STRATÉGIE | TERRITOIRES

Atelier de construction de scénarios prospectifs

Animée par Cécile Désaunay, directrice d'études à Futuribles, ou François de Jouvenel, délégué général de Futuribles, Marie Ségur, directrice d'études à Futuribles, et Quentin Bisalli, chargé d'études à Futuribles, avec la participation d'un grand témoin

Judi 9 et vendredi 10 mars 2023 • Prix : 1716 euros TTC*

Judi 22 et vendredi 23 juin 2023 • Prix : 1716 euros TTC*

La prospective pour les territoires

Animée par Frédéric Weill, directeur d'études à Futuribles spécialisé en prospective territoriale, et Quentin Bisalli, chargé d'études à Futuribles, avec les interventions d'Hugues de Jouvenel, président d'honneur de Futuribles International, et de grands témoins

Judi 16 et vendredi 17 mars 2023 • Prix : 1716 euros TTC*

La veille prospective

Pour quoi faire ? Comment faire ?

Animée par Cécile Désaunay, directrice d'études à Futuribles, avec la participation François de Jouvenel, délégué général de Futuribles International, et de deux grands témoins

Judi 23 et vendredi 24 mars 2023 • Prix : 1716 euros TTC*

Pratiques de la prospective stratégique

Animée par François Bourse et Cécile Désaunay, directeurs d'études à Futuribles, et Quentin Bisalli, chargé d'études à Futuribles

Judi 30 et vendredi 31 mars 2023 • Prix : 1716 euros TTC*

Judi 15 et vendredi 16 juin 2023 • Prix : 1716 euros TTC*

Introduction à la démarche prospective De l'anticipation à l'action

Animée par Hugues de Jouvenel, président d'honneur de Futuribles International, et Cécile Désaunay, directrice d'études à Futuribles

Vendredi 12 mai 2023 • Prix : 1116 euros TTC*

**Remise de 10 % pour inscription multiple dès la deuxième inscription ; dispense des frais d'inscription pour les membres partenaires de Futuribles International (valable pour une personne par formation dans la limite des places disponibles).
Futuribles est un organisme de formation certifié Qualiopi.*

Informations complémentaires : Corinne Roëls • E-mail : croels@futuribles.com
Futuribles International - 47, rue de Babylone - 75007 Paris - France • Tél. : + 33 (0)1 53 63 37 71
Site Internet : <https://www.futuribles.com/formations/calendrier-des-formationen//>

Difficultés de recrutement des entreprises : une analyse économique comparative

Par Antonin Bergeaud ¹ et Gilbert Cette ²

Cet article d'Antonin Bergeaud et Gilbert Cette présente une analyse économique comparée des difficultés de recrutement dans les cinq plus grands pays de la zone euro. Les auteurs rappellent d'abord que ces difficultés sont généralement plus grandes dans les pays à faible taux de chômage (Allemagne, Pays-Bas), et qu'inversement elles sont moindres dans ceux qui ont un taux de chômage plus élevé (Italie, Espagne). Ils soulignent cependant que la France à cet égard est atypique, puisque les difficultés de recrutement y sont grandes alors que le taux de chômage reste élevé. Cela témoigne, affirment-ils, d'un désajustement particulier dans l'Hexagone entre l'offre et la demande de travail, qui peut résulter de différentes causes et diffère selon que les métiers sont plus ou moins qualifiés. Parmi les moins qualifiés, deux causes principales sont retenues : le niveau des rémunérations et les conditions de travail.

Les conditions de travail relèvent, écrivent-ils, de la négociation collective qui ne peut être que favorable au progrès social. En revanche, s'agissant des salaires d'embauche, les auteurs soulignent, en s'appuyant notamment sur le taux d'emplois vacants, que ceux-ci sont insuffisamment attractifs en France, en comparaison des revenus de transfert associés au non-emploi. Ainsi affirment-ils que la réduction desdits transferts (indemnisation du chômage, revenu de solidarité active, réforme des retraites), comme cela se fait dans divers pays tels que le Danemark ou la Suède, permettrait d'améliorer en France le fonctionnement du marché du travail et serait bénéfique du point de vue économique. Leur propos est au cœur du débat que soulèvent les projets de réforme portés ces derniers mois par le gouvernement français. H.J.

1. Professeur d'économie à HEC (École des hautes études commerciales).

2. Professeur d'économie à Neoma Business School, membre du comité de rédaction de la revue *Futuribles* et conseiller scientifique de *Futuribles International*.

Les entreprises européennes ont rencontré des difficultés grandissantes pour recruter au cours des années précédant la crise sanitaire, particulièrement dans les pays à faible taux de chômage comme l'Allemagne ou les Pays-Bas. Si ces difficultés ont temporairement diminué pendant la crise, elles ont repris de l'ampleur en 2022. Elles demeurent modérées en Italie et en Espagne où le taux de chômage est plus élevé. La France se distingue par des difficultés de recrutement fortes alors que le taux de chômage y est encore élevé. Ce constat suggère un fonctionnement du marché du travail moins performant qu'en Allemagne et aux Pays-Bas. Cela conduit à une inefficacité accrue dans l'allocation des facteurs de production, qui pourrait, sans la mise en place de réformes structurelles appropriées, pénaliser la croissance à long terme.

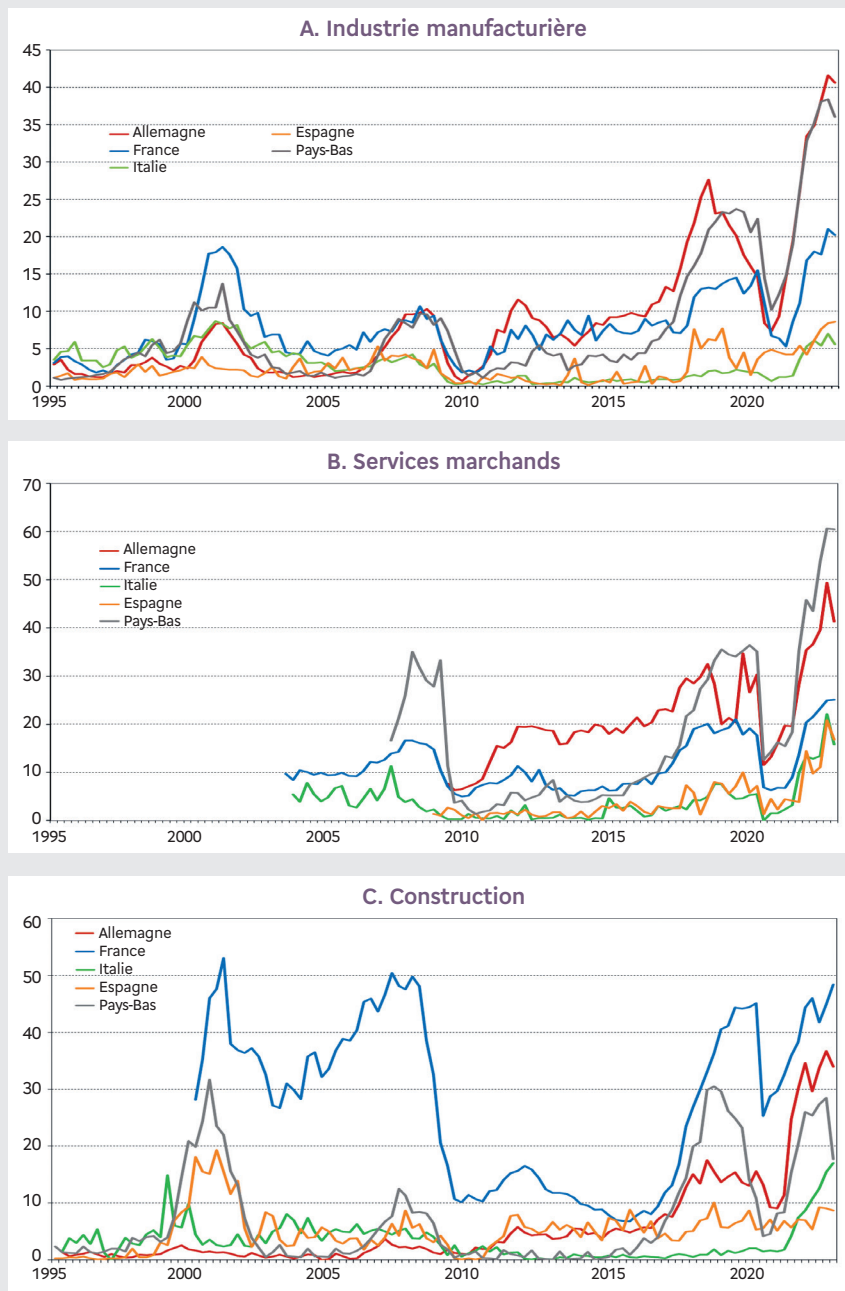
Les difficultés de recrutement des entreprises ont augmenté

Les désajustements sur le marché du travail peuvent être évalués à travers deux indicateurs clefs : le nombre d'entreprises faisant face à des difficultés de recrutement et le taux d'emplois vacants. Les difficultés de recrutement des entreprises sont mesurées en Europe à travers une enquête trimestrielle menée par la Commission européenne, et mise en œuvre en France par l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE),

depuis le début des années 1990, dans le cadre de son enquête trimestrielle de conjoncture. Dans cette enquête, les entreprises sont interrogées sur d'éventuelles contraintes pesant sur leur production et, parmi ces contraintes, sur l'importance des difficultés à recruter. Le taux d'emplois vacants est quant à lui mesuré tous les trimestres depuis 2003 par la Direction de l'animation de la recherche, des études et des statistiques (DARES, ministère de l'Emploi) à partir de l'enquête sur l'activité et les conditions d'emploi de la main-d'œuvre (enquête ACEMO). Il rapporte le nombre d'emplois vacants à l'emploi potentiel qui est la somme de l'emploi et des emplois vacants.

Le taux d'emplois vacants et les difficultés de recrutement peuvent varier de manière non coordonnée pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les sources de données utilisées pour ces deux indicateurs sont différentes. Ensuite, des difficultés de recrutement ne signifient pas nécessairement qu'il y a des emplois immédiatement vacants. Enfin, une entreprise connaissant des difficultés de recrutement aura le même poids dans l'indicateur mesurant ces difficultés au niveau national quelle que soit l'ampleur de ces difficultés, alors qu'elle aura un poids plus important dans l'indicateur de la DARES sur les emplois vacants. Toutefois, sur la période actuelle, ces différents indicateurs aboutissent à un diagnostic similaire concernant les désajustements

Série de graphiques 1. **Part des entreprises se déclarant limitées dans leur offre par des difficultés de recrutement, dans les cinq plus grands pays de la zone euro, de 1995 à 2022 (en %)**



Sources : Eurostat, Commission européenne, enquête trimestrielle de conjoncture.

sur le marché du travail. Aussi, nous ne commentons ci-dessous que les indicateurs de difficultés de recrutement construits par la Commission européenne, qui d'une part permettent des comparaisons internationales entre pays européens, et d'autre part peuvent être déclinés par secteurs d'activité, ce qui permet d'affiner l'analyse concernant les désajustements quantitatifs sur le marché du travail.

La série de graphiques 1 représente l'évolution de la part des entreprises signalant des difficultés de recrutement dans chacun des trois grands secteurs de l'économie marchande (industrie manufacturière, services marchands et construction) dans les cinq plus grands pays de la zone euro (Allemagne, France, Italie, Espagne et Pays-Bas) depuis 1995.

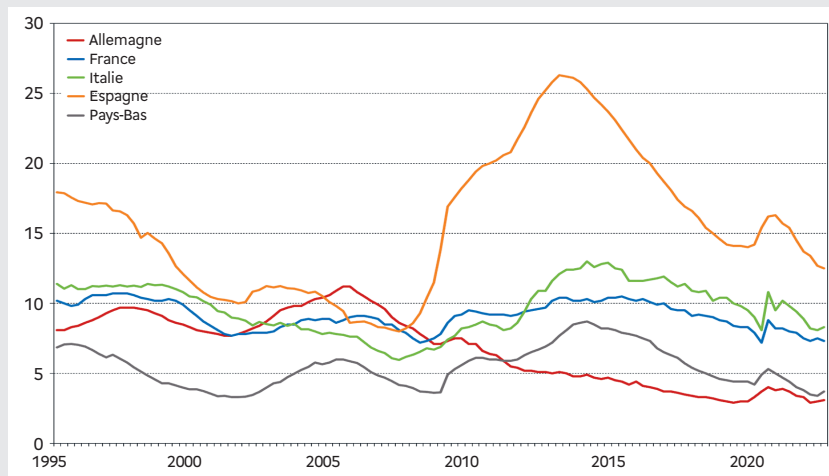
Plusieurs observations peuvent être faites à partir de ces évolutions. Tout d'abord, dans les cinq pays et les trois grands secteurs considérés, les difficultés de recrutement étaient déjà orientées à la hausse avant la crise sanitaire. Cette hausse s'accompagnait en outre d'une tendance baissière du taux de chômage (voir le graphique 2). Les difficultés de recrutement semblaient donc davantage liées au dynamisme des embauches et à des tensions croissantes sur le marché du travail, et ont pu atteindre des niveaux historiquement élevés en 2019. Elles ont ensuite fortement diminué avec la crise sanitaire et le ralentissement de l'activité économique, et donc des em-

bauches, en particulier durant les différents confinements, puis se sont à nouveau orientées à la hausse en 2021. Les niveaux atteints fin 2022 par les difficultés de recrutement sont de nouveau historiquement hauts dans chacun des cinq pays et des trois grands secteurs.

Ensuite, dans l'industrie manufacturière et les services marchands, la hiérarchie des difficultés de recrutement entre pays reflète celle observée concernant le taux de chômage (voir le graphique 2). Les difficultés de recrutement sont ainsi les plus fortes en Allemagne et aux Pays-Bas où le taux de chômage est le plus faible, et elles sont les plus faibles en Italie et en Espagne où le taux de chômage est le plus élevé. La France se situe dans une position intermédiaire, concernant à la fois les difficultés de recrutement et le taux de chômage. Dans la construction, cette hiérarchie est également observée à l'exception de la France qui pâtit des plus fortes difficultés de recrutement.

La France connaît donc une position singulière : le taux de chômage y est encore élevé et les difficultés de recrutement y sont fortes. Cette singularité peut être le symptôme d'un mauvais fonctionnement du marché du travail ou d'une inadéquation entre la demande en compétences et l'offre. Ceci aboutit à un taux de chômage structurel plus élevé que dans des pays comme l'Allemagne ou les Pays-Bas, et au-dessous duquel il est très difficile de descendre.

Graphique 2. Taux de chômage dans les cinq plus grands pays de la zone euro, de 1995 à 2022 (en %)



Source : Eurostat.

Quelles sont les sources et les conséquences de ces difficultés de recrutement ?

Les désajustements sur le marché du travail peuvent avoir de nombreuses causes, qui peuvent provenir à la fois de problèmes d'offre ou de demande de travail, entraînant une inadéquation entre les deux. Les éléments qui peuvent causer ces désajustements sont largement évoqués par la littérature académique³. Tout d'abord les évolutions démographiques et le vieillissement de la population, comme c'est le cas en Allemagne, réduisent l'offre de travail de manière structurelle

et augmentent la demande dans certains métiers ne trouvant pas toujours suffisamment de candidats (en particulier dans la santé). Ensuite, une insuffisante mobilité, tant géographique (entre les villes) que professionnelle (entre les secteurs et entre les qualifications) aboutit à des frictions importantes dans le fonctionnement du marché du travail, surtout en Europe. Les choix individuels des jeunes travailleurs peuvent également conduire à refuser certaines entreprises ou des conditions de travail considérées trop pénibles au regard de la rémunération proposée, comme cela a été mis en évidence par exemple aux États-

3. Pour une synthèse de cette littérature, voir BERGEAUD Antonin, CETTE Gilbert et STARY Joffrey, « Difficultés de recrutement et caractéristiques des entreprises : une analyse sur données d'entreprises françaises », *Économie et statistique*, n° 534-35, 2022, p. 43-59. URL : https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/6530513/03_ESS34-35_Bergeaud-Cette_FR.pdf. Voir également RÉMY Véronique, « Compétences inadéquates, efforts de recrutement insuffisants : quelle place dans les difficultés d'embauche ? », *Les Notes de la MAR (Mission animation de la recherche de la DARES)*, n° 3, mai 2022. URL : https://dares.travail-emploi.gouv.fr/sites/default/files/d77d972f3b8e86ec14d2d778d744bfb0/Dares_Compétences_inadéquates-efforts_insuffisants_quelle_place_dans_les_difficultés_d'embauche.pdf. Consultés le 27 janvier 2023.

Unis. Enfin, comme lors de chaque révolution industrielle, les évolutions technologiques renforcent les désajustements en termes de qualification. Toutefois, les tentatives d'évaluer quantitativement l'impact de ces différentes sources ne conduisent généralement qu'à des effets assez faibles par rapport aux désajustements quantitatifs mesurés, en particulier pour un pays comme la France qui se caractérise par un taux de chômage élevé et de fortes difficultés de recrutement.

L'étude de Moustapha Niang et Thomas Vroylandt ⁴ permet d'éclairer la situation en France. Leur analyse des tensions sur le marché du travail français avant la crise Covid montre qu'au-delà de désajustements de court terme dans une économie où l'emploi connaissait une croissance prononcée, ces tensions correspondent à deux types de métiers. Tout d'abord, des métiers plutôt qualifiés, par exemple dans l'industrie : les tensions y résultent d'une insuffisance structurelle de l'offre de travail par rapport aux besoins des entreprises et traduisent un défaut de formation et d'adaptation de cette offre de travail. Ensuite, des métiers plutôt peu qualifiés, par exemple dans les aides à domicile et les aides ménagères, ou encore dans les

hôtels, cafés et restaurants ou dans le secteur de la construction. Pour ce second type de métiers, dans un pays encore en chômage massif comme la France, les tensions traduisent surtout un défaut d'attractivité. Quantitativement, la seconde source de difficultés de recrutement est de loin la plus massive, même si la première ne doit pas pour autant être négligée. Véronique Rémy ⁵ estime que les efforts de recrutement des employeurs pourraient être insuffisants, leurs exigences ayant même possiblement augmenté sur les deux dernières décennies. Cette explication doit toutefois être relativisée dans le cas de la France où le taux d'emploi atteint actuellement des niveaux élevés et jamais observés encore sur les dernières décennies ⁶.

L'insuffisante attractivité de nombreux postes de travail peu qualifiés peut recouvrir deux aspects : la rémunération et les conditions de travail. Concernant la rémunération, les résultats d'une enquête réalisée en 2019 par la Banque de France auprès d'entreprises industrielles indique qu'une majorité (54 % précisément) des entreprises déclarant rencontrer des difficultés de recrutement attribuent elles-mêmes ces dernières à des salaires d'embauches insuffisants ⁷. Mais les entreprises dans

4. NIANG Moustapha et VROYLANDT Thomas, « Les tensions sur le marché du travail en 2019 », *DARES Résultats*, n° 32, octobre 2020. URL : https://dares.travail-emploi.gouv.fr/sites/default/files/pdf/dares_marche_du_travail_tensions_en_2019.pdf. Consulté le 27 janvier 2023.

5. *Op. cit.*

6. Pour autant, le taux d'emploi demeure encore en moyenne nettement inférieur en France à celui de nombreux pays européens, comme par exemple l'Allemagne et les Pays-Bas, en particulier chez les jeunes et les seniors.

7. Voir l'analyse de cette enquête proposée par BERGAUD Antonin, CETTE Gilbert et STARY Joffrey, *op. cit.*

cette situation pâtiennent d'une situation financière significativement moins favorable que les autres, ce qui y rend difficile un renforcement de l'attractivité des postes de travail via une augmentation des salaires.

Dans le débat actuel sur la contribution d'une insuffisante rémunération aux fortes difficultés de recrutement en France, la question de l'offre effective de travail ne peut être ignorée. Une distance insuffisante entre les revenus de transferts associés au non-emploi (prestations diverses parmi lesquelles l'indemnisation du chômage) et les revenus associés à l'emploi peut, dans diverses configurations familiales et sociales, être parfois réduite⁸. Le renforcement de l'attractivité salariale de nombreux postes de travail peut alors aussi appeler un conditionnement plus attentif du bénéficiaire de certaines prestations en rapport avec la recherche effective d'emploi, comme cela se fait dans divers pays nordiques et scandinaves tels que le Danemark ou la Suède. Cette orientation a inspiré les réformes récentes de l'indemnisation du chômage, et par exemple celle réduisant la durée de l'indemnisation lorsque le taux de chômage passe au-dessous de certains seuils. Mais, compte tenu des spécificités professionnelles et géographiques du déséquilibre entre offre et

demande de travail que traduit l'indicateur agrégé de difficultés de recrutement, cette approche gagnerait sans doute à être davantage individualisée en étant portée de façon exigeante par Pôle emploi. Une telle approche est aussi celle qui inspire l'idée d'un conditionnement plus attentif du bénéficiaire d'autres prestations comme le RSA (revenu de solidarité active) qui pourrait être expérimenté dans certains départements.

La question d'une attractivité insuffisante de nombreux emplois du fait de conditions de travail pénibles est également souvent évoquée. Les résultats de l'enquête réalisée par la Banque de France en 2019 indiquent que 31 % des entreprises signalant des difficultés de recrutement en attribuent au moins en partie la cause à une forte pénibilité des conditions de travail⁹. Cette source des difficultés de recrutement a pu voir son importance augmenter au sortir de la crise sanitaire qui, en ce domaine, a sans doute été une sorte de révélateur, en particulier durant les périodes de confinement. Elle semble d'ailleurs effective dans de nombreux pays avancés et pas seulement en France, les pénuries massives de main-d'œuvre s'y observant dans les mêmes activités aux conditions de travail difficiles. La réponse à cette difficulté peut passer par la

8. Voir sur ce sujet les nombreuses simulations proposées dans les rapports du Groupe d'experts sur le SMIC (salaire minimum interprofessionnel de croissance), téléchargeables sur cet URL : <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/2018/12/21/rapport-annuel-du-groupe-d-experts-smic>. Consulté le 27 janvier 2023.

9. BERGEAUD Antonin, CETTE Gilbert et STARY Joffrey, *op. cit.*

négociation collective, afin que soient discutées et négociées au niveau des branches des transformations des conditions de travail augmentant l'attractivité de nombreux emplois sans conséquences sur la compétitivité entre entreprises de la même branche. On ne peut que se féliciter que le progrès social emprunte une telle voie d'une amélioration qualitative de l'emploi au XXI^e siècle, les améliorations du XX^e siècle ayant plutôt été principalement commandées par la question de la santé au travail.

La littérature économique présente fréquemment les difficultés de recrutement comme concernant des entreprises en moyenne plus performantes que les autres. Ces difficultés à embaucher et donc à croître pénaliseraient alors les performances moyennes de l'économie. L'analyse des résultats de l'enquête réalisée par la Banque de France en 2019 auprès d'entreprises de l'industrie manufacturière indique en effet que la productivité est significativement plus élevée dans les entreprises connaissant des difficultés de recrutement que dans les autres. Toutes choses égales par ailleurs, les entreprises déclarant des difficultés de recrutement sont en moyenne environ 7 % plus productives que les autres entreprises ayant cherché à recruter en 2019. Ce résultat suggère que les difficultés de recrutement sont susceptibles d'amplifier la mauvaise allocation des facteurs de

production entre les entreprises, qui est déjà une source importante du ralentissement de la productivité agrégée. Néanmoins, sur la base d'hypothèses très simplifiées, il ressort de l'évaluation proposée dans notre article¹⁰ que ces difficultés de recrutement aboutiraient à abaisser la productivité moyenne dans l'industrie manufacturière d'environ 0,1 % à 0,15 %, ce qui paraît faible.

Le fonctionnement du marché du travail : l'enseignement des courbes de Beveridge

L'économiste anglais William Beveridge (1879-1963) a proposé une grille de lecture du marché du travail à travers les célèbres courbes de Beveridge qui représentent sur un quadrant le taux d'emplois vacants et le taux de chômage. Ces courbes sont normalement décroissantes : plus le taux de chômage est élevé, plus faible est le taux d'emplois vacants. Un déplacement de cette courbe vis-à-vis de la bissectrice renseigne sur l'évolution du fonctionnement du marché du travail. Ainsi, un déplacement vers le haut de la bissectrice témoigne d'une détérioration de l'appariement entre offre et demande de travail : un même taux de chômage est associé à un taux d'emplois vacants plus élevé. À l'inverse, un déplacement vers le bas de cette bissectrice témoigne d'une amélioration de l'appariement : un même taux de chômage est associé à un

10. *Ibidem*.

taux d'emplois vacants plus faible. L'un des objectifs des réformes structurelles du marché du travail est ainsi de déplacer la courbe de Beveridge vers le bas de la bissectrice, et d'améliorer l'appariement entre offre et demande de travail et donc la qualité du fonctionnement du marché du travail.

La série de graphiques 3 présente des courbes de Beveridge pour les cinq plus grands pays de la zone euro pour chaque trimestre sur la période 1995-2022. Le taux de chômage est au sens du Bureau international du travail (BIT) et le taux d'emplois vacants est ici remplacé par la proportion d'entreprises industrielles dont l'offre est limitée par des difficultés de recrutement. Les points de ces courbes correspondant à la crise sanitaire (les trois trimestres à partir du deuxième trimestre 2020) sont fragilisés par une mesure du taux de chômage affectée par des modifications transitoires du comportement d'activité dans le contexte de cette crise, en particulier durant les périodes de confinement.

L'Allemagne se caractérise par une courbe de Beveridge assez stable sur la période, les observations se déplaçant de situations à fort taux de chômage et faibles difficultés de recrutement en début de période, vers des situations à faible taux de chômage et fortes diffi-

cultés de recrutement ensuite. Ce déplacement sur une courbe de Beveridge assez stable s'y opère à partir du milieu de la décennie 2000-2010 et la mise en œuvre des réformes Hartz sur le marché du travail¹¹. Sur la fin de la période, le dynamisme de l'emploi se traduit par l'augmentation des difficultés de recrutement, le taux de chômage semblant avoir atteint un plancher à environ 3 %.

En Italie et en Espagne, bien que floutée par de fortes variations des difficultés de recrutement, la courbe de Beveridge se situe à des niveaux plus élevés qu'en Allemagne, ce qui suggère que le fonctionnement du marché du travail y serait moins performant. Un même taux de chômage s'y traduirait par de plus fortes difficultés de recrutement. Avec cependant des difficultés de recrutement toujours faibles, la courbe de Beveridge se déplace nettement vers le bas de la bissectrice après 2000 en Italie, ce qui suggère pour ce pays une amélioration du fonctionnement du marché du travail (un même taux de chômage y est associé à des difficultés de recrutement moins fortes en fin de période qu'en début de période). À l'opposé, la courbe de Beveridge demeure depuis la crise sanitaire plus élevée qu'avant en Espagne, ce qui suggère, si ce déplacement se confirme dans les années qui

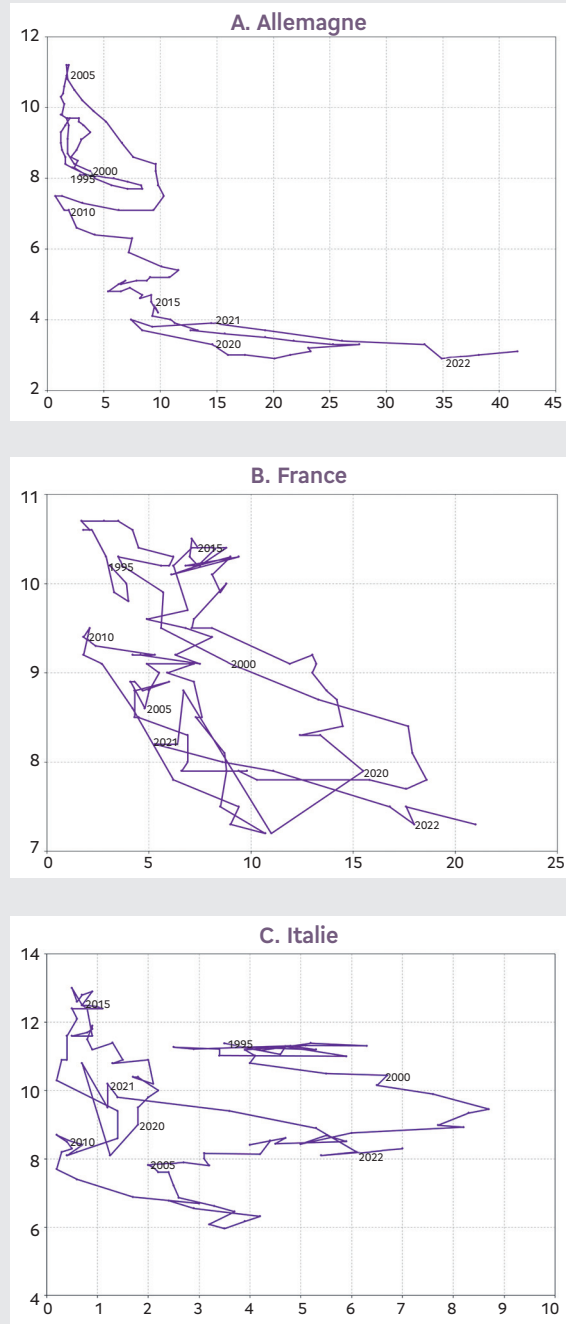
11. Pour une revue de littérature et une analyse des réformes Hartz, voir par exemple BOUVARD Flore *et alii*, « Réformes Hartz : quels effets sur le marché du travail allemand ? », *Trésor-Eco*, n° 110, mars 2013. URL : <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/b60c4b28-bfd2-4cc6-8052-c353f04607a8/files/4e426a19-bfc5-499b-a875-941307e169e5> ; ou HOCHMUTH Brigitte *et alii*, « Hartz IV and the Decline of German Unemployment: A Macroeconomic Evaluation », *Journal of Economic Dynamic and Control*, Vol. 127, juin 2021. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2021.104114>. Consultés le 27 janvier 2023.

viennent, une détérioration du fonctionnement du marché du travail.

Aux Pays-Bas, la courbe de Beveridge est plus basse qu'en Allemagne, ce qui suggère que le fonctionnement du marché du travail y serait plus performant. Comme en Espagne, la courbe de Beveridge y demeure depuis la crise sanitaire plus élevée qu'avant, et si ce déplacement s'y confirme dans les années qui viennent, il pourrait aussi y traduire une détérioration du fonctionnement du marché du travail. Bien qu'également floutée par de fortes variations des difficultés de recrutement, la courbe de Beveridge paraît aussi assez stable en France, mais elle est positionnée plus haut sur la bissectrice qu'en Allemagne (un même taux de chômage est associé à des difficultés de recrutement plus importantes), ce qui y suggère un fonctionnement moins efficace du marché du travail.

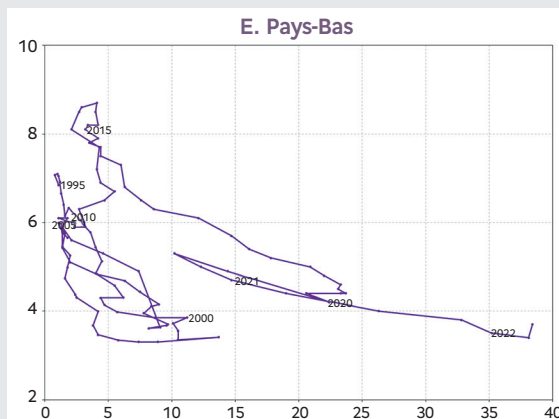
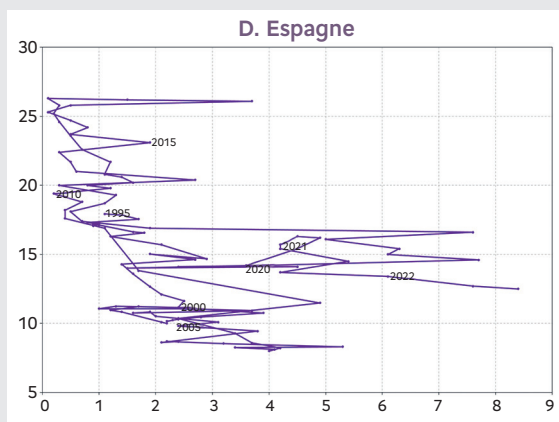
Ce dernier constat confirme le besoin de réformes structurelles en France visant à y améliorer le fonctionnement du marché du travail. Les réformes en cours ou envisagées de l'assu-

Série de graphiques 3. Courbe de Beveridge des cinq plus grands pays de la zone euro, de 1995 à 2022



rance chômage, du RSA et des retraits vont dans cette direction. Mais d'autres réformes seraient souhaitables pour améliorer le fonctionnement du marché du travail. La formation, d'abord, qu'elle soit initiale ou profession-

nelle. Mais aussi celle des institutions comme Pôle emploi qui accompagnent les chômeurs, et celle des prestations diverses et variées qui peuvent dans certains cas nourrir des effets de trappes à inactivité. ■



N.B. : chaque point représente, pour un trimestre donné, le taux de chômage (en %, axe horizontal des abscisses) et la proportion d'entreprises de l'industrie manufacturière dont l'offre est limitée par des difficultés de recrutement (en %, axe vertical des ordonnées).

Lecture : en France, au 1^{er} trimestre 2022, le taux de chômage était de 7,3 % et 18 % des entreprises de l'industrie manufacturière signalaient des difficultés de recrutement.

Sources : Eurostat, Commission européenne, enquête trimestrielle de conjoncture.

PRATIQUES DE LA PROSPECTIVE STRATÉGIQUE

FORMATION FUTURIBLES INTERNATIONAL | 30-31 MARS 2023 | PARIS

Intervenants

Animée par **François Bourse**, directeur d'études à Futuribles,
Cécile Désaunay, directrice d'études à Futuribles,
Quentin Bisalli, chargé d'études à Futuribles,
avec la participation d'un grand témoin.

Objectifs pédagogiques et compétences visées

Cette session est centrée sur les pratiques professionnelles avec une attention particulière portée aux processus, c'est-à-dire à la manière dont est concrètement conçue, puis menée une démarche de prospective. Elle vise à :

- s'approprier les concepts et les différentes approches de la prospective stratégique à partir d'exposés théoriques, de présentations de cas concrets de prospective d'entreprise et de prospective territoriale ;
- savoir lancer une démarche de prospective stratégique, en étant capable d'en formuler le sujet ; de définir les principales étapes de la démarche ; d'en concevoir le dispositif ; d'identifier les méthodes et techniques les plus adaptées ;
- connaître les tenants et aboutissants de plusieurs techniques fréquemment utilisées en prospective stratégique au travers de temps de travail collectif sur cas réel.

Programme

- Idées clés de l'approche prospective
- Concevoir et lancer une démarche de prospective
- Construire le référentiel prospectif (1) : la base d'analyse
- Construire le référentiel prospectif (2) : les hypothèses clés et les enquêtes prospectives
- Présentation du cadre théorique des scénarios
- Bâtir et utiliser les scénarios
- Articuler prospective et stratégie

Prix

Les frais d'inscription sont de 1 430 euros HT (1 716 euros TTC, TVA à 20 % incluse)*. Ils comprennent la participation à la formation et les supports. Les déjeuners sont offerts aux participants.

Futuribles International est un organisme de formation certifié Qualiopi.

Renseignements complémentaires

Programme détaillé consultable à l'adresse <https://www.futuribles.com/formation/pratiques-de-la-prospective-strategique-4/#programme/> ou envoyé sur demande auprès de Corinne Roëls - Futuribles International - 47, rue de Babylone - 75007 Paris - France • Tél. : + 33 (0)1 53 63 37 71 • E-mail : croels@futuribles.com

**Remise de 10 % pour inscription multiple dès la deuxième inscription ; dispense des frais d'inscription pour les membres partenaires de Futuribles International (valable pour une personne par formation dans la limite des places disponibles).*

Droits humains ou énergie : le dilemme

Par Jean-François Drevet ¹

Voilà maintenant plus d'un an que la Russie a envahi l'Ukraine, entraînant de vives réactions des pays occidentaux, Union européenne incluse, traduites notamment au travers d'une série de sanctions économiques. Ces sanctions, qui touchent en particulier le secteur énergétique (la Russie étant le premier fournisseur de combustibles fossiles de l'Union), ont eu pour conséquence de mettre en lumière l'extrême dépendance des Européens en matière d'énergie. La défense des valeurs démocratiques n'est pas négociable, mais elle a un coût. Et les alternatives pour contourner Moscou en matière énergétique ne sont guère plus vertueuses puisque la plupart des producteurs d'énergie fossile se situent au Moyen-Orient, dans des pays aussi réputés pour leur respect des droits humains que l'Iran, l'Arabie Saoudite, le Qatar... De fait, en attendant d'avoir largement développé les énergies renouvelables, et à moins de repartir vers le nucléaire, voire le charbon, le dilemme défense de la démocratie et des libertés versus sécurité énergétique risque de perdurer. C'est ce que montre cette chronique européenne, rappelant l'histoire récente de ce dilemme et examinant ses perspectives de (non)-résolution à moyen terme. S.D.

La guerre en Ukraine n'a pas fini de secouer l'Union européenne (UE). Elle met en évidence l'inadéquation, sinon la faillite de politiques déjà anciennes et que l'on a voulu poursuivre en dépit de leurs inconvénients. Face au risque de pénurie d'énergie, l'UE est-elle en mesure de concilier sa sécurité avec le respect de ses valeurs ?

Après des années d'« insouciance stratégique », pour reprendre une expression des prospectivistes des années 1960, serait-elle entrée sans le savoir dans un « scénario de l'inacceptable ² » ?

Les pays européens, parce qu'ils sont presque tous structurellement importateurs nets d'éner-

1. Ancien fonctionnaire à la Commission européenne. Les propos exprimés ici n'engagent que leur auteur.

2. Une expression popularisée par la DATAR (Délégation à l'aménagement du territoire et à l'action régionale), dans sa collection Travaux et recherches de prospective des années 1965-1980.

gie, s'intéressent-ils au caractère démocratique des pays fournisseurs ? La question mérite d'être posée puisqu'on découvre un peu tard que ce n'est pas la même chose d'acheter son gaz à la Norvège ou à la Russie. Parce que ce dilemme n'est pas nouveau, nous allons d'abord remonter aux chocs pétroliers des années 1970, avant de tenter d'identifier à quelles contraintes l'UE se trouve confrontée aujourd'hui, et dans les années à venir.

Les enseignements des chocs pétroliers des années 1970

Plusieurs observateurs constatent que l'épreuve actuelle, par sa brutalité et la nécessité de lui trouver rapidement des réponses, présente quelques analogies avec les chocs subis par l'Europe lors des crises de 1973-1974 et de 1979-1980.

La dépendance européenne est ancienne. À la fin des années 1950, dans les pays qui en ont en abondance (notamment l'Allemagne et le Royaume-Uni, puisque l'Europe du Sud en était presque totalement dépourvue), le charbon — qui a nourri la révolution industrielle — apparaît comme une énergie dépassée, non seulement parce que polluant et dangereux pour ceux qui l'extrait, mais aussi trop coûteux par rapport aux autres sources d'énergie.

Bien que l'Europe n'ait pas sur son territoire de sources alternatives en quantité suffisante, son abandon est donc inévitable. En effet, à la différence de l'Amérique du Nord, elle ne dispose pas d'assez d'hydrocarbures pour assurer sa sécurité énergétique. Et depuis qu'elle a été mise en évidence par les guerres mondiales, successivement vis-à-vis des États-Unis, puis du Moyen-Orient, sa dépendance au pétrole et au gaz naturel n'a fait que s'aggraver.

Cette dépendance est durable et collective, mais les réponses des pays européens ont été nationales, en dépit de l'existence de la Communauté européenne du charbon et de l'acier (CECA) et de l'Euratom. Dans certains pays, la mise en exploitation des hydrocarbures de la mer du Nord, plus coûteux que ceux du Moyen-Orient mais politiquement plus sûrs, a fait remonter le taux d'autosuffisance. Dans d'autres, cette réponse a été demandée au nucléaire. C'est le cas de la France, où la dépendance énergétique était depuis longtemps un sujet de préoccupation (faute d'avoir jamais produit assez de charbon³). En conséquence, elle a été le seul pays à lancer un vaste programme de production d'électricité nucléaire. S'il n'était pas suffisant pour lui donner une complète indépendance, il lui a apporté un taux d'autosuffisance plus élevé⁴. Comme ses voisins

3. Ni de gaz puisque le gisement de Lacq, pour lequel elle s'est dotée d'un vaste réseau de distribution, ne produit que cinq milliards de mètres cubes par an.

4. Bien qu'une partie importante de l'uranium soit importé, cette dépendance n'est pas comparable à celle des hydrocarbures.

européens, elle a continué de s'approvisionner en Méditerranée et au Moyen-Orient, le secteur des transports restant fortement importateur.

À cette époque et même ensuite, bien peu d'importance a été accordée aux performances démocratiques des fournisseurs. Jusqu'au milieu des années 1970, les pays d'Europe du Sud eux-mêmes sont encore des dictatures. Pendant la guerre froide, sous l'influence des États-Unis, on privilégie les achats aux pays de la péninsule arabe qui ont les gisements les plus abondants, les plus faciles à exploiter et d'importants excédents. L'obsession anti-communiste des États-Unis et de leurs compagnies pétrolières joue contre d'autres exportateurs réputés progressistes, mais jugés trop attirés par l'URSS pour être des partenaires fiables. La France n'est pas en reste, ses démêlés avec l'Algérie remontant aux années précédant le choc pétrolier.

Ensuite, la démocratie n'a pas fait suffisamment de progrès en Afrique du Nord et au Moyen-Orient pour que l'Europe puisse choisir ses fournisseurs. Aussi les pétromonarchies ont-elles pu accumuler des excédents énormes qui leur ont permis de diffuser leur idéologie rétrograde dans

l'ensemble du monde musulman ⁵, ce qui n'a pas inquiété les Occidentaux, convaincus que l'islamisme était un bon antidote à la propagande soviétique. Quand le danger est devenu évident, ils se sont réfugiés dans le déni, jusqu'à imaginer naïvement qu'il pouvait exister des démocrates islamistes, comme il y a en Europe des démocrates-chrétiens. Non seulement l'Occident ne s'est pas soucié des droits humains dans la région, mais il a consolidé les régimes les moins à même de les développer. Cette erreur de jugement, qui succède à d'autres faites dans le passé ⁶, n'a pas fini de peser sur la vulnérabilité de l'UE.

La fin du rêve eurasiatique

En ouvrant à l'UE un immense arrière-pays eurasiatique, la fin de la guerre froide était de nature à apporter de nouvelles opportunités. Les oléoducs ⁷ construits pour alimenter les satellites de l'URSS en Europe centrale et orientale ont été prolongés, puis doublés par des gazoducs pour accroître les approvisionnements de l'Europe occidentale en énergie fossile. En dépit de leur coût d'extraction élevé, les nouveaux gisements de l'Arctique ont été en mesure d'approvisionner l'Europe à des prix compétitifs. Bien placée

5. CONESA Pierre, *Dr. Saoud et Mr. Djihad. La diplomatie religieuse de l'Arabie Saoudite*, Paris : Robert Laffont (Le Monde comme il va), 2016.

6. Toute l'histoire de la « Question d'Orient » montre comment, en prolongeant artificiellement la vie de l'Empire ottoman au cours du XIX^e siècle, les puissances ont entravé le développement des peuples balkaniques et contribué à un retard qui n'est pas encore résorbé aujourd'hui.

7. L'oléoduc Droujba (qui signifie « amitié » en russe) est le plus long du monde (4 000 kilomètres). Il a été décidé en 1959 dans le cadre du COMECON (Conseil d'assistance économique mutuelle), pour approvisionner les démocraties populaires européennes en pétrole russe. Mis en service en 1963, il a transporté jusqu'en 2022 du pétrole vers l'Europe occidentale à travers l'Ukraine, la Hongrie et la Pologne.

pour fournir la Russie en produits manufacturés, l'UE a pu effectuer en retour des importations massives d'hydrocarbures et de matières premières.

Ce fut une excellente affaire pour l'Allemagne, combinant les intérêts économiques de son industrie chimique (qui n'a pas seulement besoin du gaz russe pour son énergie, mais aussi comme matière première). C'était aussi un bon compromis politique pour la chancelière Angela Merkel, qui pouvait ainsi satisfaire à la fois le patronat (toujours influent auprès de l'Union chrétienne-démocrate / CDU) et les écologistes viscéralement opposés au nucléaire. Après la catastrophe de Fukushima (2011), les écologistes allemands ayant convaincu leurs collègues européens, l'option de Berlin est devenue européenne. Même la France, en dépit de son choix ancien en faveur du nucléaire, s'y est conformée en arrêtant la centrale de Fessenheim et en programmant la fermeture d'autres centrales. Cette option a été plus ou moins imposée à l'Europe en tant que produit de transition, en attendant la montée en puissance des renouvelables.

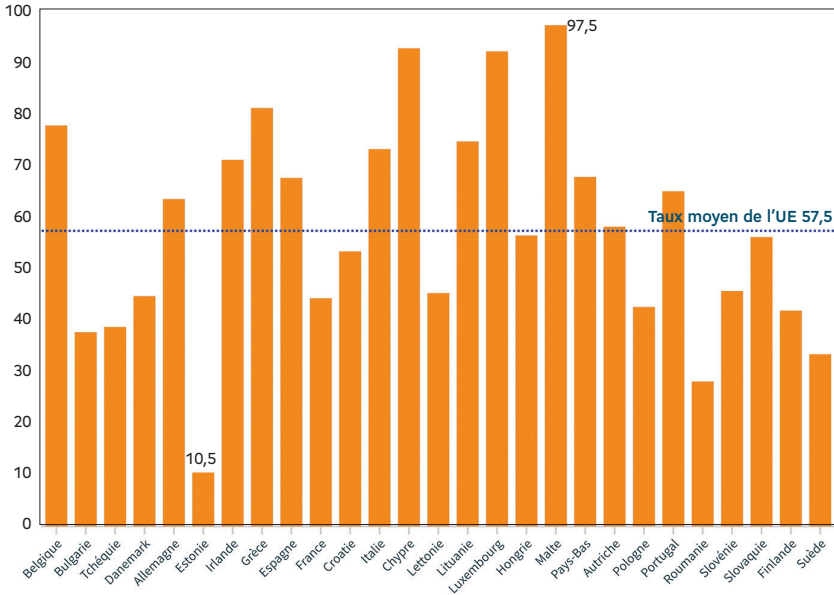
En recourant comme les États-Unis à un fournisseur continental, l'UE avait-elle trouvé son Canada ? Consolider les débouchés de l'industrie manufacturière européenne dans un pays aux besoins immenses et solvable pouvait être une excellente affaire si la Russie avait été démocratique. Mais l'oligarchie au pouvoir à Moscou en a décidé autrement, car ses deux

priorités géopolitiques entrent en opposition avec cet objectif. D'une part, elle veut obstinément maintenir son influence sur son « étranger proche », au besoin par la force (ce qui avait commencé avec Boris Eltsine s'est confirmé avec Vladimir Poutine). D'autre part, sa méfiance viscérale vis-à-vis de la démocratie s'est accentuée quand le maintien de l'influence russe s'est révélé incompatible avec les aspirations des ex-républiques soviétiques européennes.

En 2003, la Russie n'a pas voulu s'intégrer dans la politique de voisinage, trop fondée à ses yeux sur l'imitation du modèle européen. S'il était assez logique qu'elle souhaite un traitement particulier, compte tenu de sa taille et de sa puissance, elle voulait surtout obtenir la reconnaissance d'une zone d'influence sur son étranger proche, qui est aussi celui de l'UE. C'était impossible pour Bruxelles, suite aux « révolutions de couleur » en Géorgie en 2008, puis en Ukraine en 2014. Pour le Kremlin, la même tendance étant à l'œuvre en Biélorussie (à la suite de la réélection frauduleuse d'Alexandre Loukachenko en 2020) et en Arménie (si mal défendue par la Russie, en dépit de son adhésion à l'Organisation du traité de sécurité collective / OTSC), il devenait clair que le Partenariat oriental allait basculer du côté de l'UE. Ce scénario des dominos ne pouvait pas laisser Moscou sans réaction, mais on ne l'a pas compris en Europe, puisque à côté du premier gazoduc Nord Stream, l'Allemagne en a accepté un second.

La dépendance énergétique de l'UE en chiffres

Taux de dépendance énergétique (en %)



Source : Eurostat.

L'Union européenne est un importateur net d'énergie. En 2020, près de 58 % de l'énergie disponible dans l'UE ont été produits à l'extérieur des États membres de l'UE. Le graphique ci-dessus fait apparaître le taux de dépendance énergétique de chaque État membre, ainsi que la moyenne de l'UE, ce qui montre dans quelle mesure les différents pays et l'UE dans son ensemble dépendent des importations pour répondre à leurs besoins énergétiques.

L'UE dans son ensemble affichait un taux de dépendance de 57,5 % en 2020. La situation varie considérablement d'un État membre à l'autre : l'Estonie affichait un taux de dépendance de 10,5 %, l'Allemagne de 63,7 %, la Grèce de 81,4 % et Malte de 97,5 %.

La Russie est le principal fournisseur de combustibles fossiles de l'UE. Plus de la moitié des combustibles fossiles solides importés en 2020 (principalement du charbon) provenait de ce pays, de même que 43 % du gaz naturel importé. Depuis mars 2022, suite à l'invasion de l'Ukraine par la Russie, les dirigeants de l'UE s'efforcent de se défaire progressivement de cette dépendance aux combustibles fossiles russes. ■

Futuribles

Source : Conseil de l'UE, infographies « Dans quelle mesure les États membres de l'UE sont-ils dépendants des importations d'énergie ? » et « D'où provient l'énergie de l'UE ? » URL, respectivement : <https://www.consilium.europa.eu/fr/infographics/how-dependent-are-eu-member-states-on-energy-imports/> et <https://www.consilium.europa.eu/fr/infographics/where-does-the-eu-s-energy-come-from/>. Consultés le 31 janvier 2023.

Quelles perspectives de sécurité énergétique pour l'UE ?

Comment faire pour rétablir la sécurité énergétique d'une Europe en perte d'insouciance stratégique quand elle est rattrapée par la géopolitique ? La volonté de l'UE de défendre ses valeurs n'est pas sa seule priorité, ni même la plus importante dans la mesure où entrent aussi en compte l'évolution des prix, les questions écologiques et la réduction de la dépendance.

Alors qu'il a montré ses limites, l'UE croit toujours aux vertus régulatrices du marché, notamment parce qu'il demeure un plus petit commun dénominateur entre ses États membres, donc un moyen de créer un consensus, en masquant les désaccords profonds qui perdurent en politique étrangère.

L'Union est maintenant confrontée à une forte hausse des prix, aggravée par un mode de calcul du prix du gaz qui majore ses effets sur la population. Cette option est jugée acceptable par certains écologistes qui pensent que cela va accélérer la transition vers les énergies renouvelables, un scénario contesté par les économistes qui estiment que leur développement sera durablement handicapé par des contraintes techniques. Ainsi le consommateur européen sera-t-il longtemps exposé à des prix élevés, sans bénéficier des contreparties attendues en matière de décarbonation de l'économie. Et les producteurs devront faire face

à la concurrence d'une industrie américaine favorisée par l'énergie à bon marché offerte par le gaz de schiste, que l'UE n'a pas voulu produire.

Cette évolution est-elle politiquement acceptable ? Bien que la hausse des prix paraisse inévitable, la Commission européenne n'est pas parvenue à convaincre les États membres d'acheter du gaz en commun. Pour le moment l'Allemagne ne veut pas l'accepter, parce que son industrie chimique menacée d'asphyxie est prête à payer très cher ses approvisionnements, en attendant de bénéficier des opportunités offertes par des importations de gaz naturel liquéfié (GNL). Mais il faudra un peu de temps, car les écologistes allemands ont longtemps bloqué la construction de plates-formes de regazéification dans les ports de la mer du Nord.

Si elle veut continuer son évolution vers une économie décarbonée, alors que les besoins sont accrus par le passage à l'électricité dans les transports, l'UE n'a pas beaucoup d'alternatives en dehors du recours au nucléaire. De nombreux économistes pensent même que cette dépendance est durable, en raison des contraintes techniques qui handicapent les renouvelables, au moins aussi longtemps que des technologies nouvelles ne seront pas disponibles.

En fait, beaucoup d'observateurs estiment que les écologistes ont eu raison sur le long terme (en soulignant l'importance du changement climatique), ainsi

que sur le court terme (dans leur rôle de lanceurs d'alerte appelant à répondre sans tarder à l'urgence climatique), mais qu'ils se sont lourdement trompés sur le moyen terme, à cause de leur phobie du nucléaire, en sous-estimant les contraintes de la transition énergétique. Comment corriger cette bévue ?

Alors que le temps est compté, la construction de centrales nucléaires prendra du temps. Il en résulte un retour paradoxal à des sources d'énergie très polluantes, notamment le charbon et même le lignite, et le maintien d'un fort niveau d'importation de combustibles fossiles, puisqu'ils ne sont pas disponibles dans l'UE et qu'il faut se priver du gaz russe.

Cette dépendance n'était pourtant pas sans remède. Mais en 2020, face aux agressions turques, l'absence de réaction efficace de l'UE a entravé la mise en exploitation du gaz découvert en Méditerranée orientale. Les États-Unis en ont conclu que le projet de gazoduc Eastmed était condamné et ont cessé de le soutenir. Trois années plus tard, rien ne montre que cette carence a été compensée. Tétanisée par le chantage turc à l'immigration sauvage, l'UE est en passe de renoncer à un potentiel que certains spécialistes ont comparé à celui de la mer du Nord.

Dans un marché de l'énergie très tendu, il n'est pas facile pour l'UE de trouver des fournisseurs

alternatifs à la Russie sans leur offrir des contreparties. Comme le montre le *Qatargate*, les effets politiques de la dépendance énergétique sont déjà bien présents⁸ et on peut craindre qu'ils s'accroissent, les dictatures étant habiles pour faire monter les pressions.

Alimenté comme en Europe par le populisme, l'islamisme a encore de beaux jours devant lui. Bien que fortement contesté, notamment en Iran et en Turquie, il a encore quelques chances de se maintenir au pouvoir. Même si la péninsule arabe aborde un après-pétrole très problématique et si la société au Maghreb réclame plus de liberté, les régimes autoritaires ne vont pas si facilement disparaître.

À l'exception de la Norvège, très proche de l'UE, et de quelques pays exportateurs de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques), on ne trouve pas beaucoup de démocraties en mesure de remplacer la Russie. Pour une période indéterminée, l'UE n'a pas d'alternative à courtiser des régimes autoritaires et parfois obscurantistes, et à entrer en concurrence avec les grands importateurs asiatiques, bien moins regardants sur le niveau de démocratie de leurs fournisseurs. Il est donc à craindre que l'étendue des besoins énergétiques mette à mal le discours moralisateur de l'UE et que cet écart soit amené à augmenter, compte tenu des perspectives

8. Voir l'interview de l'eurodéputée Nathalie Loiseau par Gérald Papy, « Nathalie Loiseau : "Par leur ingérence, des régimes autoritaires veulent affaiblir la démocratie" », *Le Vif / L'Express*, 22 décembre 2022, p. 34-39.

assez sombres de la démocratie dans ces pays.

Les récents voyages des dirigeants européens dans les pays exportateurs de gaz ne mettent pas l'UE en position de force, aussi bien dans les pays de la péninsule arabique qu'en Azerbaïdjan, dont la présidente de la Commission a vanté la « stabilité ». C'est précisément ce qu'on disait des emprunts russes pour les faire souscrire aux épargnants français au début du XX^e siècle et on a vu le résultat.

Le point crucial est dans la définition d'une future relation avec la Russie après la guerre. Jusqu'où pourrait-on revenir à la complémentarité qui s'était développée depuis la fin de la guerre froide ? Si le préalable démocratique qui paraît maintenant une nécessité stratégique ne peut pas se concrétiser, comment s'accorder sur un accord à long terme et être en capacité de le faire respecter ?

Si le pays reste une dictature, ce sera un donnant-donnant plutôt précaire et pas facile à négocier, puisqu'il concernera aussi bien les relations avec l'étranger proche, la Russie elle-même et un « compromis énergie », dont il est encore malaisé d'esquisser les contours. On peut parier qu'il ne sera pas facile d'y insérer des clauses de respect des valeurs de l'Europe.



De ce problème complexe aux multiples composantes, nous n'avons pu donner ici que quelques éléments sommaires. Des décennies de discussions intensives entre les institutions européennes et les États membres n'ont pas permis de faire émerger une politique commune à la hauteur des besoins, ce qui prive l'UE de moyens d'action efficaces.

Une certaine forme de renoncement aux valeurs est déjà discernable dans l'attitude de plusieurs États membres, prêts à mettre leurs principes de côté en échange d'une peut-être illusoire sécurité de leurs approvisionnements. Par ailleurs, la gestion du secteur énergétique reste marquée par de profondes divergences entre sources d'énergie, rationalité économique et priorités écologiques. Et la guerre en Ukraine laisse craindre une dépendance insurmontable vis-à-vis des pays tiers dans les années à venir.

À plus long terme, bien que la promotion des valeurs de l'Europe n'ait pas été et ne soit pas encore une priorité des énergéticiens nationaux, il est généralement admis que seule l'accession à la démocratie de plusieurs pays de la périphérie apportera à l'Union européenne une contribution décisive à sa sécurité énergétique. En attendant cela, pouvons-nous espérer que les débats internes feront au moins émerger une approche commune, à défaut de politique ? ■

Idées & faits porteurs d'avenir*

Le début de la fin de l'habitat pavillonnaire en France ?

Louis Maurin

L'habitat pavillonnaire amorce-t-il, en France, une phase de déclin après des décennies de progression ? La part de logements individuels au sein de l'ensemble des résidences principales diminue et s'élève à 55,9 % en 2022 contre 56,6 % en 2015. Le nombre de nouveaux logements individuels construits, qui dépassait 250 000 par an au milieu des années 2000, est tombé autour de 150 000 depuis le milieu des années 2010. Les ventes de maisons individuelles par des promoteurs à des particuliers¹ ont chuté de 10 % au cours des trois premiers trimestres de 2022 par rapport à la même période de 2021.

Il y a plusieurs explications à cela. Le coût du foncier ne cesse de progresser : entre 2005 et 2020, le prix moyen du mètre carré de terrain à bâtir a été multiplié par deux, de 46 à 91 euros, selon les données du ministère de la

Transition écologique. L'évolution de la réglementation thermique en 2012, notamment, a entraîné une augmentation des prix de la construction, qui ont au total progressé de 44 % entre 2011 et 2020. En même temps, la stagnation des revenus des classes populaires et moyennes a rendu plus difficile l'accès à la propriété d'un grand nombre de ménages. Enfin, même si les projets de développements routiers et autoroutiers continuent à voir le jour, leur progression est beaucoup moins rapide depuis une dizaine d'années : le nombre de kilomètres d'autoroute stagne depuis le milieu des années 2010, selon le ministère des Transports. Ces facteurs pèsent davantage sur les logements individuels dont le nombre diminue, mais entraînent aussi une stagnation pour les logements collectifs.

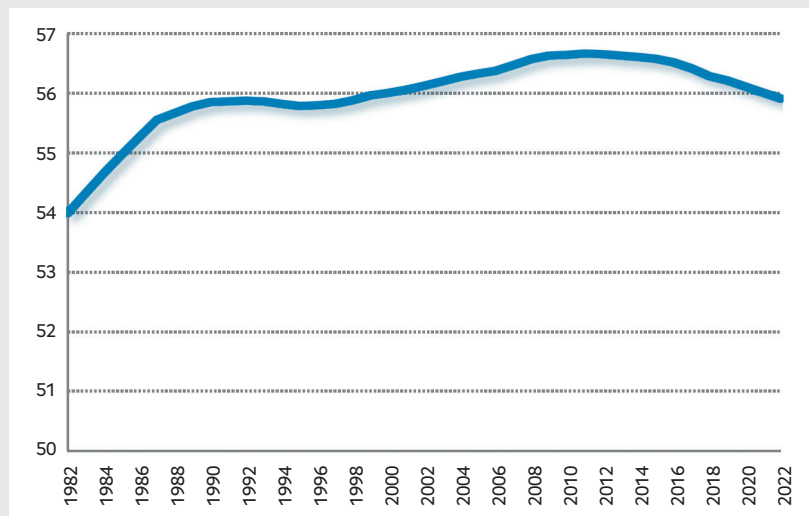
Assiste-t-on à un « désenchantement pavillonnaire² » ? Il est bien trop tôt pour le dire. Déjà, entre le milieu des années 1980 et le milieu des années 1990, la part de logements individuels s'était

1. Seules les mises en vente de lots de plus de cinq maisons par des promoteurs sont concernées.

2. MARCHAL Hervé et STÉBÉ Jean-Marc, « Le désenchantement pavillonnaire », *SociologieS*, dossier « Où en est le pavillonnaire ? », 2017. URL : <https://doi.org/10.4000/sociologies.5957>. Consulté le 6 février 2023.

*La plupart des textes publiés dans la rubrique Actualités prospectives sont issus de Vigie, le système de veille mutualisée de l'association Futuribles International (NDLR).

Part des maisons dans l'ensemble des résidences principales (en %)



Source : INSEE (Institut national de la statistique et des études économiques) - © Centre d'observation de la société.

stabilisée puis avait repris son essor à partir du début des années 2000. Il n'est pas dit que l'on n'assiste pas, demain, à un retour du pavillon. La maison individuelle assortie d'un jardin, méprisée par une partie des catégories favorisées, reste le lieu de vie idéal de la plupart des familles³. Et dans l'idéal, 80 % des Français souhaiteraient habiter une maison, selon un sondage Kantar Public⁴.

Et demain ?

À l'avenir, plusieurs facteurs devraient limiter l'expansion pavillonnaire. L'évolution des prix

de l'énergie et des carburants renchérit fortement le coût de ce mode de vie. Pour une surface de 70 à 100 mètres carrés, une maison individuelle consomme environ 40 % d'énergie en plus au mètre carré qu'un logement d'immeuble collectif, et ceci hors coût des transports associés. Même s'il est difficile de prévoir les évolutions des prix du pétrole et du gaz, la tendance à long terme à la hausse devrait se prolonger, ce qui pourrait conduire à des arbitrages économiques plus favorables à la ville. Il faudra aussi prendre en compte l'effet de l'étalement urbain sur l'environnement : la surface des sols artificialisés a augmenté de 70 % entre 1982 et 2018, selon Agreste⁵, ce qui nuit à la

3. DAMON Julien, « Les Français et l'habitat individuel : préférences révélées et déclarées », *Sociologie(S)*, *ibidem*. URL : <https://doi.org/10.4000/sociologies.5886>. Consulté le 6 février 2023.

4. « Deuxième édition du baromètre des villes moyennes », Kantar Public / La Fabrique de la cité, 20 octobre 2022. URL : <https://www.lafabriquedelacite.com/publications/deuxieme-edition-du-barometre-des-villes-moyennes/>. Consulté le 6 février 2023.

5. « L'occupation du sol entre 1982 et 2018 », *Les Dossiers*, n° 3, avril 2021, Agreste. URL : <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download>

biodiversité et accélère le réchauffement climatique. La loi Climat et résilience d'août 2021 fixe d'ailleurs comme objectif « zéro artificialisation des sols » en 2050. Enfin, les projets de nouvelles infrastructures routières sont de plus en plus contestés.

Comment arriver à concilier les contraintes économiques et environnementales avec les aspirations de la population ? La densification de l'habitat est l'un des enjeux majeurs des sociétés modernes. Comme le montrent un certain nombre d'études ⁶, l'alternative pourrait être le développement de « l'habitat dense individuel », composé de logements individuels accolés avec jardin, sur des parcelles de surface totale pouvant être inférieure, pour les plus petites, à la surface de la maison individuelle pure.

Seuls 6 % des Français souhaitent vivre dans un logement sans jardin, selon Kantar Public, mais cela ne signifie pas pour autant qu'ils aient besoin d'un parc : pour 37 % d'entre eux, 250 mètres carrés de jardin suffiraient ; et pour 71 %, 500 mètres carrés. Ce

type d'habitat, cœur historique de l'urbanisation (le « bourg » devenu ville), pourrait répondre à la fois à l'individualisation du logement et au défi du respect de l'environnement. D'autant plus qu'il peut adopter des formes très diversifiées, notamment en matière de surface. Reste que selon les données du ministère du Logement, la construction de 1,3 million de logements a été autorisée entre 2019 et 2021. Parmi eux, on compte 32 % de maisons, 48 % d'appartements et seulement 11 % de logements individuels groupés, qui correspondent le mieux à ce qui devrait être favorisé. Il reste donc du chemin à parcourir. ■

Source : cette note est issue d'un partenariat avec le Centre d'observation de la société (<http://www.observationsociete.fr/>).

Existe-t-il une alternative à la batterie lithium-ion ?

Pierre Papon

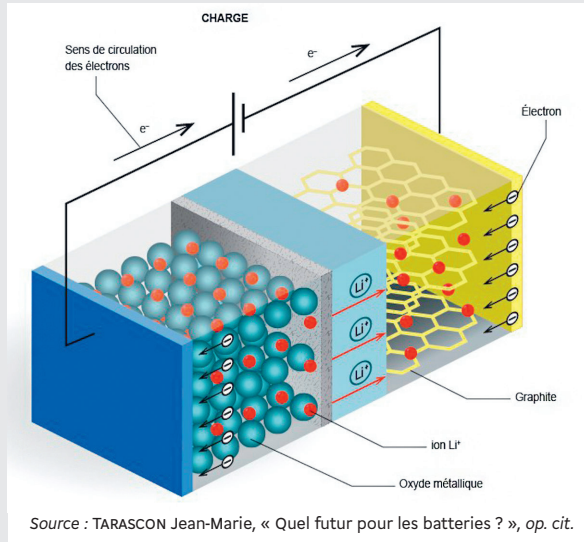
La batterie lithium-ion est aujourd'hui le cheval de bataille de l'industrie automobile dans la production de véhicules électriques. Elle a été inventée dans les années 1970 alors que la crise pétrolière de 1973 avait incité Exxon à financer des recherches sur les batteries qui aboutirent à sa mise au point par Stanley Whittingham (le prix Nobel de chimie lui fut attribué pour cela en 2019, ainsi qu'à ses collègues John B. Goodenough et Akira Yoshino) ; elle fut commercialisée par Sony en 1991 pour équiper des appareils électroniques.

[load/publication/publie/Dos2103/Dossiers_2021-3_TERUTI.pdf](#). Consulté le 6 février 2023.

6. Voir par exemple PEIGNÉ Éric, *Analyse du modèle "maison de ville / maison de bourg" en région Centre-Val de Loire. Étude DREAL 2012-2014*, DREAL (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement) Centre-Val de Loire, février 2015. URL : http://www.centre.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Analyse_du_mondele_maison_de_ville_maison_de_bourg_region_Centrev2_cle25812b.pdf ; ou « L'habitat dense individuel : une troisième voie à construire », CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment), 2008. URL : <http://www.cstb.fr/archives/webzines/editions/edition-de-decembre-2008/lhabitat-individuel-dense-une-troisieme-voie-a-construire.html>. Consulté le 6 février 2023.

Fonctionnement de la batterie

La batterie est constituée d'un ensemble de cellules dotées de deux électrodes séparées par un électrolyte liquide et qui sont le siège de réactions électro-chimiques¹. L'électrode positive (la cathode lorsque la batterie est chargée) est constituée de couches d'oxydes de lithium, de cobalt (remplacé éventuellement par le nickel) et de manganèse (la batterie dite NMC, la plus utilisée aujourd'hui) ou de phosphates de lithium et de fer, les ions lithium s'insérant à l'anode dans des couches de graphite (la batterie LFP, moins coûteuse, privilégiée par Tesla et les constructeurs chinois). L'électrolyte est un liquide séparant les électrodes



Source : TARASCON Jean-Marie, « Quel futur pour les batteries ? », *op. cit.*

assurant le transit des charges électriques : une solution de sels de lithium (des phosphates, des chlorures et des fluorures), soit dans des carbonates d'éthylène ou de propylène, soit dans des esters carboxyliques. Lors de la décharge, l'anode débite des électrons dans un circuit extérieur, et les ions lithium chargés positivement traversent l'électrolyte et s'insèrent dans les couches d'oxydes de la cathode. ■

1. TARASCON Jean-Marie, « Quel futur pour les batteries ? », *Pour la science*, n° 522, avril 2021, p. 44. URL : <https://www.pourlascience.fr/sd/energie/quel-futur-pour-les-batteries-21651.php> ; et TARASCON Jean-Marie, « Material Science as a Cornerstone Driving Battery Research », *Nature Materials*, vol. 21, septembre 2022, p. 979.

La densité électrique des batteries lithium-ion actuelles est au maximum de 250 wattheures par kilogramme (Wh/kg) – avec un rendement du stockage de l'énergie électrique de 90 % lors de la charge –, avec un coût de 170-200 euros par kilowattheure (kWh). Celui-ci a chuté d'un facteur 10 en 20 ans, mais il a augmenté en 2022 du fait de la hausse du prix des matériaux, notamment du

cobalt et du nickel. Ces batteries offrent une autonomie de 250-450 kilomètres aux véhicules, avec une durée de vie de 10 ans. La durée de recharge des batteries, dépendant du temps de trajet des ions entre les électrodes, a aussi beaucoup diminué. Elle est de 8 à 10 heures pour les batteries classiques et Tesla, le *leader* dans ce domaine, annonce des temps de recharge à 80 % de 30 à 15

minutes sur ses bornes à forte puissance.

Les performances des batteries peuvent être diminuées par des réactions à l'interface électrolyte / électrode (dépôts de lithium métallique pendant les cycles de charge / décharge), la formation de dendrites pouvant provoquer des courts-circuits avec des dégagements de chaleur qui abîment l'interface électrode / électrolyte. Par ailleurs, l'intercalation d'ions dans les électrodes provoque leur déformation, dégradant aussi les performances.

Afin d'améliorer toujours plus la performance des batteries (augmenter leur densité énergétique et leur sécurité, diminuer leur coût et le temps de recharge), plusieurs pistes d'innovation sont aujourd'hui testées par les constructeurs.

La batterie « tout solide »

La batterie « tout solide » est un objectif clef : on remplace l'électrolyte liquide par un solide, constituant un conducteur ionique, comme par exemple des sels de sodium dissous dans un polymère solide ; des céramiques avec des sulfures de lithium et de silicium ; des oxydes mixtes cristallins de lithium, de lanthane et de zirconium ; ou éventuellement du gallium et de l'aluminium. Le duo lithium-polymère avec des oxydes et une anode en lithium métallique est privilégié. La batterie, plus compacte, a une plus grande densité énergétique et une recharge rapide ; l'électrolyte ne fuyant pas, elle est aussi

plus sûre. Selon la société QuantumScape, associée à Volkswagen, elle se chargerait en 15 minutes avec une densité énergétique supérieure de 80 % à celle de la batterie classique, mais elle n'est pas encore commercialisée ¹.

La solution des matériaux organiques... et du chauffage ?

L'utilisation de matériaux organiques dans les cathodes est une alternative : des molécules de diimide de pérylène (cinq cycles benzéniques) qui s'associent sous forme de rubans hélicoïdaux. Des chercheurs de l'université Columbia ont montré que des ions lithium s'intercalent entre ces rubans dans une cathode de batterie constituée de ce matériau. Ses performances seraient 50 fois supérieures à celles de la batterie lithium-ion classique : une densité énergétique de 28 kWh/kg supportant 10 000 cycles de charge / décharge rapides ² ! Si ces électrodes étaient stables, elles ouvriraient de nouvelles perspectives.

Une autre possibilité est testée à l'université de Pennsylvanie et à l'Institut de technologie de Pékin : en chauffant à 65 °C une batterie lithium-ion pendant 12 voire

1. WAGEMAKER Marnix, HUIJBEN Mark et TROMP Moniek, « Where Are those Promising Solid-state Batteries? », *Europhysics News*, vol. 52, n° 5, novembre 2021, p. 28.

2. BALL Philip, « A New Twist for Lithium Batteries », *Nature Materials*, vol. 21, septembre 2022, p. 993 ; et ZEXIN Jin et alii, « Iterative Synthesis of Contorted Macromolecular Ladders for Fast-charging and Long-life Lithium Batteries », *Journal of the American Chemical Society*, vol. 144, n° 30, juillet 2022, p. 13973-13980. URL : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jacs.2c06527>. Consulté le 6 février 2023.

11 minutes lors de sa recharge à 75 % de sa pleine charge, celle-ci supporterait de 900 à 2 000 cycles de charge / décharge³. L'élévation de température diminue le temps de transit des charges électriques dans l'électrolyte et donc la durée de la recharge. Il reste à montrer que sa durée de vie ne serait pas diminuée.

Perspectives

Il n'existe pas encore de solution idéale pour améliorer considérablement les performances des batteries. En dépit des propos optimistes sur les performances de la batterie « tout-solide », il est prudent de ne pas parier trop tôt sur une solution miracle : Jean-Marie Tarascon (médaille d'or du CNRS [Centre national de la recherche scientifique] en 2022 pour ses travaux en électrochimie) estimait, en mars 2021, « qu'une batterie conférant à un véhicule électrique une autonomie de 800 km et rechargeable en 10 minutes était inconcevable⁴ ». Existerait-il, néanmoins, des alternatives à la batterie lithium-ion ? Le remplacement du lithium par du sodium, et du graphite de l'anode par du silicium, est envisagé. La capacité de stockage augmenterait, mais l'instabilité de l'interface avec l'électrolyte pourrait diminuer les performances. Les couples lithium-soufre (le soufre n'étant pas sans risques) et lithium-oxygène (l'oxygène de l'air oxyde les ions

lithium) sont aussi envisagés, mais une option sodium-ion est privilégiée. Cette batterie est étudiée par le RS2E (Réseau sur le stockage électrochimique de l'énergie), réseau du CNRS créé avec le soutien du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, et associant des industriels. En voie de commercialisation, sa densité énergétique (140 Wh/kg) est plus faible que celle de la batterie lithium-ion (200-250 Wh/kg), mais elle peut délivrer de plus fortes puissances (40 kW/kg) que la batterie lithium-ion. Elle a deux avantages : le sodium (présent dans l'eau de mer) est bien plus abondant que le lithium, et elle n'utilise ni cobalt ni nickel.

Un mix électrique avec des filières renouvelables intermittentes (le solaire et l'éolien) nécessitera des capacités de stockage de l'électricité importantes, avec des batteries stationnaires, mais avec des exigences de densité énergétique moins draconiennes. Une filière sodium-soufre a été testée (notamment par EDF à La Réunion), elle a une densité énergétique moyenne (100 Wh/kg) mais utilise du soufre et du sodium à l'état liquide à une température de 300 °C. Observons, enfin, que l'utilisation à grande échelle des batteries électriques posera le problème à la fois de l'approvisionnement en métaux critiques et de leur recyclage. Les performances des batteries ont enregistré des progrès importants ces 20 dernières années, grâce à une recherche très active, et les industriels espèrent une véritable rupture technique. ■

3. CHAO-YANG Wang et alii, « Fast Charging of Energy-dense Lithium-ion Batteries », *Nature*, vol. 611, 17 novembre 2022, p. 485.

4. TARASCON Jean-Marie, « Quel futur pour les batteries ? », *op. cit.*

Les Français et le travail

Hugues de Jouvenel

« Faire le *buzz* », de préférence avec des formules en anglais, serait-il devenu le principal objectif des médias et des réseaux sociaux ? Ce que pensent les Français du travail est un sujet d'actualité, d'autant que le gouvernement français enchaîne les projets de réforme qui visent à les inciter à travailler plus longtemps. Après le grand nombre de démissions enregistrées pendant quelques trimestres, le terme de « grande démission » (*great resignation*) importé des États-Unis s'est répandu à grande vitesse avant qu'il ne soit remplacé par le *quiet quitting* (la démission silencieuse), venant aussi d'Outre-Atlantique qui lui-même semble aujourd'hui remplacé — merci TikTok ! — par « *Act your wage* » (travaillez à hauteur de votre salaire, pas plus), formules qui semblent témoigner du fait que les Français se détournent de la valeur travail.

L'enquête réalisée par le cabinet de conseil Kearney, en s'appuyant sur un sondage mené en septembre 2022 auprès de 5 001 actifs français, et divulguée le 3 février 2023 par l'Institut Montaigne est fort bienvenue ¹. Elle révèle que 77 % des sondés se déclarent satisfaits au travail ; et les deux tiers d'entre eux jugent que le

travail occupe « une juste place » dans leur vie. Certes, les plus satisfaits sont les chefs d'entreprise, les artisans et les professions libérales, alors que les moins satisfaits sont plutôt ouvriers de l'industrie, employés du commerce et administratifs d'entreprise.

Les actifs à temps plein déclarent travailler en moyenne 39,8 heures par semaine, un peu moins que les indépendants (45,8 heures), mais estiment que leur charge de travail a augmenté au cours des cinq dernières années, et 31 % des sondés disent qu'ils seraient prêts « à travailler plus pour gagner plus ». Ces derniers sont clairement minoritaires. En revanche, 48 % d'entre eux estiment que l'âge de la retraite est (déjà) « trop élevé » et 44 % des sondés souhaitent partir de manière anticipée à la retraite quitte à voir leur pension réduite... ■

L'avenir radieux du fret aérien dans nos achats ?

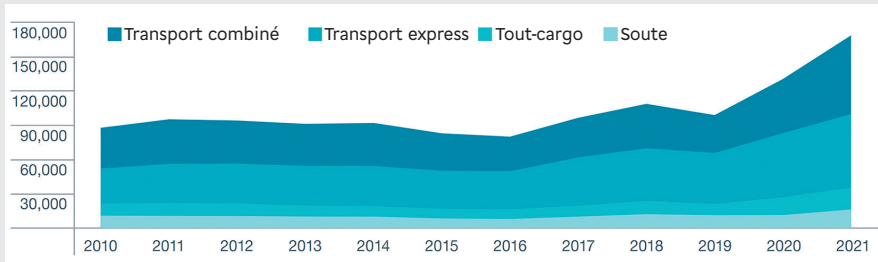
Véronique Lamblin

Tous les deux ans, le département Fret de Boeing publie sa prévision d'évolution du marché du fret aérien (*World Air Cargo Forecast*). La dernière édition ¹ tombe à pic, car si le transport aérien de passagers ne s'est pas encore remis de la pandémie de Covid, le fret aérien, lui, a vu ses revenus forte-

1. MARTINOT Bertrand et THOMAS-DARBOIS Lisa, *Les Français au travail : dépasser les idées reçues*, Institut Montaigne, février 2023. URL : <https://www.institutmontaigne.org/publications/les-francais-au-travail-depasser-les-idees-recues>. Consulté le 6 février 2023.

1. *World Air Cargo Forecast, 2022-2041*, Boeing, 2022. URL : https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/market/assets/downloads/Boeing_World_Air_Cargo_Forecast_2022.pdf. Consulté le 6 février 2023.

Graphique 1. Évolution des revenus du transport aérien par avion-cargo (en millions de dollars US)



Source : World Air Cargo Forecast 2022-2041, op. cit., p. 12.

ment augmenter en 2020 et 2021 : de 100 milliards de dollars US en 2019 à 170 milliards en 2021, alors que le volume transporté vient juste de retrouver son niveau antérieur à la pandémie.

Cela est dû en partie au besoin supplémentaire de transport de matériel médical pendant la pandémie et les confinements. Quand le transport de passagers était à l'arrêt, les marchandises habituellement transportées avec les passagers, qui représentent environ la moitié du fret aérien, ont davantage utilisé les avions-cargos. En 2021, c'est plutôt l'explosion des prix du transport par conteneurs maritimes, liée à l'engorgement des ports chinois et aux effets de la politique zéro Covid dans ce pays, qui a favorisé cet engouement pour le transport aérien. Malgré une baisse considérable des prix relatifs de l'aérien par rapport au bateau depuis 2020, l'avion demeure toutefois quatre à huit fois plus cher que le transport maritime.

La rupture, liée à la pandémie de Covid, est donc que le fret, depuis deux ans, est beaucoup plus transporté dans des avions-cargos

dédiés, le fret transporté avec les passagers ne représentant plus que 10 % des revenus du secteur (contre 50 % auparavant). Selon Boeing, cette évolution du fret dans des avions spécialisés est pérenne pour plusieurs raisons : les routes du transport aérien de passagers ne correspondent pas aux principales routes de demande de fret, leurs horaires ne correspondent pas aux besoins des logisticiens du fret, le transport en palettes que les transporteurs préfèrent n'est pas possible dans les avions monocouloirs et, enfin, les soutes des avions de passagers ne peuvent pas transporter de matières dangereuses et sont limitées en charge utile.

L'autre tendance est que le fret aérien express, qui intègre toute la logistique et les dédouanements au départ comme à l'arrivée, gagne des parts de marché sur le fret aérien classique qui se négocie uniquement avec une compagnie aérienne. Ce fret aérien express avec services intégrés pesait 13,8 % du fret aérien en 2008 et a atteint 21 % en 2021.

Le transport dans les airs ne concerne pas les matériaux pon-

déreux, l'énergie ni les matières premières agricoles, et représente toujours moins de 1 % des tonnages transportés. En revanche, l'aérien transporte les produits chers, urgents ou périssables, comme l'électronique, le courrier ou des produits agroalimentaires, et représente 35 % de la valeur des marchandises transportées en intercontinental.

L'expansion de l'e-commerce devrait porter la croissance du fret aérien à l'avenir. En effet, la pandémie et les confinements ont fait bondir les achats en ligne. L'IATA estime ² que le e-commerce représentait 15 % des volumes de fret aérien en 2019, et analyse trimestriellement l'évolution conjointe des acteurs de la vente en ligne et de leur intégration ou partenariat avec les acteurs du transport aérien.

On constate que des acteurs majeurs comme Amazon, Alibaba, Taobao ou AliExpress ont complètement intégré le transport aérien, avec leur propre flotte pour le transport des colis de leurs clients, ceci afin de sécuriser les livraisons et d'en maîtriser les coûts, c'est-à-dire leur chaîne de valeur. D'autres privilégient plutôt les partenariats : China Airlines avec Pinduoduo (commerce en ligne alimentaire) pour des lignes de transport réfrigéré ; Lufthansa Cargo avec Heyworld (logisticien du e-commerce), pour livrer le

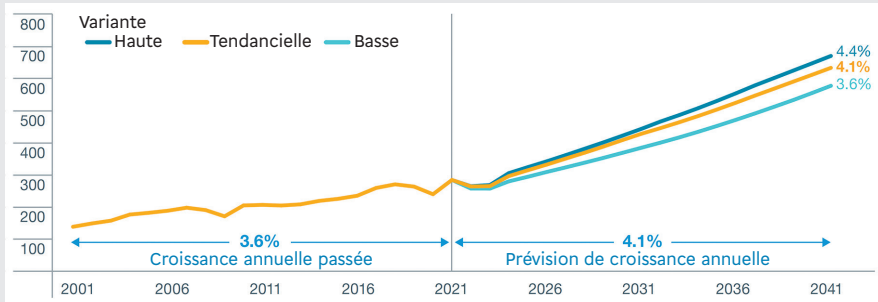
même jour d'aéroport à aéroport ; la filiale logistique d'Alibaba (Cainiao) avec Qatar Airways Cargo et Saudia Cargo.

L'étude de Boeing envisage plus qu'un doublement des revenus mondiaux du secteur d'ici à 2026 par rapport au niveau pré-pandémie — de 3,4 milliards de dollars US en 2019 à 8,1 milliards de dollars US en 2026, sachant que ce marché n'était que de 1,5 milliard de dollars US en 2015. Pour les compagnies aériennes, le fret a été un important vecteur de diversification et de réduction des risques financiers pendant la pandémie, tout comme les compagnies de fret maritime ont investi dans des avions pour diversifier leur offre de transport. L'analyse de la flotte d'avions-cargos au quatrième trimestre 2022 indique qu'il existe maintenant environ 40 opérateurs supplémentaires de fret aérien (dont CMA-CGM en France, en association avec Air France-KLM), auxquels s'ajoutent des compagnies aériennes qui ont inclus des avions-cargos dédiés à leur flotte qui ne transportait auparavant du fret que dans des avions de passagers.

À l'avenir, Boeing anticipe dans ses prévisions que la croissance du commerce mondial dépassera légèrement la croissance économique mondiale et atteindra 2,8 % par an. Ceci conduirait à un doublement du trafic sur 20 ans, soit une croissance du fret aérien en moyenne de 4,1 % par an, mesurée en revenu multiplié par les tonnes-kilomètres transportées. C'est essentiellement le com-

2. Voir la page « E-Commerce & Logistics », IATA (International Air Transport Association). URL : <https://www.iata.org/en/programs/cargo/cargo-operations/e-commerce-logistics/>. Consulté le 6 février 2023.

Graphique 2. **Croissance annuelle moyenne 2022-2041 du fret aérien en avions-cargos** (en milliards de revenu x tonnes-kilomètres [en ordonnées], et en %)



Source : World Air Cargo Forecast 2022-2041, op. cit., p. 16.

merce de l'Asie de l'Est vers l'Amérique du Nord et vers l'Europe, ainsi que le commerce intra-Asie, qui devrait tirer cette demande de transport.

Avant la pandémie, les avions-cargos ne représentaient que 8 % de la flotte aérienne (et 50 % du fret transporté par air). Fin 2021, ces avions représentaient 10 % de la flotte totale et près de 70 % du fret aérien en volume, alors que le transport de passagers n'avait pas encore récupéré son niveau de trafic antérieur à la pandémie. La perspective de la croissance forte du fret aérien conduit Boeing à anticiper une augmentation de 80 % du nombre d'avions-cargos par rapport à 2019 : 2 010 en 2019, 2 240 en 2021 et 3 610 en 2041. Mais plus de 1 800 avions de cette flotte de 2041 seraient des avions de passagers convertis en avions de fret.

Ceci étant, les prévisions à long terme de Boeing peuvent paraître optimistes quant à la croissance du commerce mondial, du fait que le boom récent du fret aérien

est davantage en revenus qu'en tonnes transportées. Les données récentes montrent, au contraire, un ralentissement des volumes :

— Le fret maritime stagne après avoir atteint des sommets au premier semestre 2022, sous l'effet d'une baisse de la consommation des pays occidentaux. Par exemple, les exportations de la Chine vers l'Europe ont baissé de 9 % en octobre 2022, en glissement annuel ³.

— Selon l'IATA, en 2022, l'activité mondiale du fret aérien en volume, mesuré en tonnes de fret-kilomètre (CTK / cargo ton kilometers) a reculé de 10,6 % en un an et baissé de 3,6 % par rapport à 2019 ⁴.

Pourtant, les opérateurs aériens envisagent, comme Boeing, un grand avenir pour le fret aérien

3. FAINSILBER Denis, « La parenthèse enchantée se referme pour le fret maritime », *Les Échos*, 14 novembre 2022.

4. MORAES Ricardo, « IATA : le fret aérien mondial en recul en septembre », *Air Journal*, 12 novembre 2022. URL : <https://www.air-journal.fr/2022-11-12-iata-le-fret-aerien-mondial-en-recul-en-septembre-5244082.html>. Consulté le 6 février 2023.

au vu de leurs commandes aux deux constructeurs d'avions-cargos dédiés en 2022 ⁵. Les principaux acteurs du fret aérien sont des compagnies américaines (notamment Fedex et UPS), mais les opérateurs chinois progressent.

Si la manne du e-commerce signifie un approvisionnement chinois pour l'Europe, les opérateurs chinois sont alors bien mieux placés pour en profiter que les opérateurs européens puisque eux seuls peuvent survoler l'espace aérien russe en ces temps de guerre. Et si de plus en plus de personnes veulent restreindre leur usage de l'avion pour limiter leurs émissions de gaz à effet de serre, les aviateurs comptent sur leurs achats sur Internet pour compenser le risque de baisse de trafic, sachant qu'il est rare de savoir d'où vient et comment sera transporté le produit commandé en trois clics. ■

5. TRÉVIDIC Bruno, « L'avenir radieux des avions-cargos et du fret aérien », *Les Échos*, 15 novembre 2022.

Fusion nucléaire : quelles perspectives ?

*Interview de Pierre Papon
par Antoine Le Bec*

Le 13 décembre 2022, le département américain de l'Énergie (DOE) officialisait le succès d'une expérience de fusion nucléaire réalisée au sein d'un laboratoire californien. Pour la première fois, l'état d'ignition a été atteint : davantage d'énergie a été produite par la réaction de fusion que l'on en a injecté

pour la déclencher. Pierre Papon revient, pour Futuribles, sur cette avancée, les perspectives qu'elle ouvre, ainsi que ses limites. ■

En quoi l'expérience du laboratoire américain du NIF (National Ignition Facility) constitue-t-elle une percée scientifique dans le domaine de la fusion nucléaire ?

P.P. : Le NIF est un laboratoire de recherche sur la fusion thermonucléaire basé à Livermore, en Californie, qui réalise cette fusion à l'aide d'un laser, selon la technique dite du « confinement inertiel ». Il a annoncé, début décembre, les résultats d'une nouvelle expérience importante. Ses chercheurs sont parvenus à produire la fusion d'une cible de deutérium et de tritium à l'aide d'une installation complexe : un laser émet des impulsions de rayonnement infrarouge qui sont amplifiées par étapes pour former 48 puis 192 faisceaux de lumière ultraviolette (UV) qui convergent sur un petit cylindre en or où est placée, dans une capsule de diamant, la cible (de la taille d'un grain de poivre). Le faisceau vaporise l'or qui, en émettant des rayons X, provoque l'implosion de la cible et la fusion thermonucléaire en une fraction de seconde, à plusieurs millions de degrés, qui émet des noyaux d'hélium et des neutrons.

Ce résultat a été qualifié d'étape « historique » car, pour la première fois, il a été possible d'obtenir plus d'énergie d'une réaction de fusion qu'il en avait été injecté pour la déclencher, réalisant ainsi

« l'ignition » du combustible ¹. En effet, les faisceaux laser ont injecté 2,05 MJ (mégajoules) d'énergie dans la cible et la fusion a dégagé 3,15 MJ, soit un gain de 1,10 MJ (54 %). Dans une expérience précédente, en juillet 2021, seulement 70 % de l'énergie des faisceaux laser avait été « récupérée », le seuil d'ignition n'avait donc pas été atteint ².

Cela signifie-t-il que la perspective d'une technologie de production quasi illimitée d'énergie bas-carbone et sans déchets radioactifs se rapproche ?

P.P. : Observons d'abord que le rendement énergétique global de cette expérience demeure très insuffisant : il n'y a pas eu de gain net d'énergie. En effet, pour obtenir le faisceau laser de 2 MJ, les chercheurs ont utilisé près de 300 MJ d'électricité car le rendement du laser est très mauvais. Il faudra donc l'augmenter, mais aussi modifier l'installation pour que le laser puisse enchaîner des tirs successifs sur des cibles pendant une longue période. De plus, cette installation a une très grande dimension car elle occupe l'équivalent de trois terrains de football. Une étape a incontestablement été franchie,

mais nous sommes encore loin du but. Comme l'ont souligné des chercheurs travaillant dans ce domaine ³, réaliser une centrale produisant de l'électricité avec cette technique n'est pas pour tout de suite. Rappelons qu'en 1955, le physicien indien Homi Bhabha, président de la première conférence internationale sur l'utilisation pacifique de l'énergie atomique, « Atoms for Peace », à Genève, déclarait : « J'ose prédire qu'une méthode sera trouvée pour libérer l'énergie de fusion de manière contrôlée au cours des deux prochaines décennies. » Depuis lors, des progrès ont certes été réalisés, mais la fusion thermonucléaire, souvent considérée comme le Saint-Graal de l'énergie, une ressource inépuisable, n'est pas encore maîtrisée.

Au-delà de la recherche fondamentale, quels sont les usages potentiels associés à ces expérimentations ?

P.P. : Le NIF est financé par la NNSA (National Nuclear Security Administration), qui dépend du DOE des États-Unis et a la charge d'assurer la sécurité de leurs armes nucléaires. Comme le laser français Mégajoule de Bordeaux, le NIF a des finalités militaires : simuler le déclenchement de la fusion thermonucléaire dans une bombe à hydrogène, les essais étant interdits par un traité jusqu'à présent respecté. Des mé-

1. L'objectif de tous les réacteurs, quel que soit leur mode de fonctionnement, est d'atteindre l'ignition (l'allumage), c'est-à-dire l'autoentretien de la fusion de façon à produire plus d'énergie que l'on en injecte dans la machine.

2. Voir à ce sujet PAPON Pierre, « Fusion thermonucléaire : un long chemin vers le Saint-Graal de l'énergie », *Note de veille*, 21 septembre 2021, Futuribles International. URL : <https://www.futuribles.com/fusion-thermonucléaire-un-long-chemin-vers-le-sain/>. Consulté le 6 février 2023.

3. CLERY Daniel, « With Historic Explosion, a Long Sought Fusion Breakthrough », *Science*, 13 décembre 2022. URL : <https://www.science.org/content/article/historic-explosion-long-sought-fusion-breakthrough>. Consulté le 6 février 2023.

dias, notamment financiers, aux États-Unis, ont consacré leur une à la percée du NIF pour souligner, un peu rapidement, que la fusion était sans doute la voie d'avenir pour résoudre le problème de la « décarbonation » de l'énergie et qu'il fallait investir dans cette technique (Bill Gates et quelques *start-ups* financent d'ailleurs des projets de petits réacteurs tokamaks). Les chercheurs du NIF, quant à eux, voudraient profiter de leur succès pour convaincre l'administration américaine d'investir davantage dans la recherche à finalité civile sur la fusion, notamment au NIF.

La percée scientifique américaine a-t-elle des implications pour les autres projets de fusion nucléaire et leur calendrier, notamment ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) en France ?

P.P. : L'autre technique pour réaliser la fusion met en œuvre un réacteur où les atomes de deutérium et de tritium sont ionisés (ils perdent leurs électrons) pour constituer un plasma confiné par un champ magnétique très élevé dans une enceinte torique appelée tokamak (terme d'origine

soviétique, les *stellarators* sont une variante) ; le plasma serait porté à 150 millions de degrés. Le projet international de réacteur ITER est le vecteur de cette technique. Il est en cours de montage, en France, à Cadarache (malgré la crise ukrainienne, une pièce importante de l'électroaimant fabriquée en Russie a été expédiée par bateau). La percée américaine ne change pas le *planning* : un premier plasma en 2025, un fonctionnement avec le deutérium et le tritium en 2035. En 2040, si l'ignition était atteinte, la faisabilité d'un réacteur atteignant une puissance thermique de 500 mégawatts serait étudiée, puis en 2045 la construction de prototypes industriels pourrait être lancée en vue de les rendre opérationnels en 2055-2060. La Chine a annoncé, fin 2021, une percée de l'un de ses tokamaks, en entretenant une réaction pendant 17 minutes à 70 millions de degrés. Quoi qu'il en soit, l'horizon du développement d'une filière de réacteurs utilisant la fusion thermonucléaire est encore lointain, bien au-delà de 2050, mais d'ici là, d'autres solutions pourraient voir le jour, par exemple des réacteurs hybrides utilisant la fission et les neutrons produits par la fusion... ■

Cette étude analyse en profondeur et avec un recul critique, les transformations majeures à l'œuvre dans l'ensemble des maillons de la chaîne alimentaire, en se basant sur :

- ▶ les données les plus récentes : enquêtes de consommation, données statistiques et commerciales, innovations produit, programmes de recherche en cours ;
- ▶ les points de vue d'acteurs et d'experts du système alimentaire.

Les 10 transformations majeures

- ▶ La montée du *snacking*
- ▶ La végétalisation des régimes alimentaires : végétarisme, véganisme, flexitarisme
- ▶ Les substituts aux produits animaux
- ▶ Les nouvelles sources de protéines
- ▶ Vers une démocratisation du bio ?
- ▶ Des aliments-santé à la nutrition personnalisée
- ▶ Produits locaux et circuits courts : la consommation locavore
- ▶ La révolution de l'e-commerce
- ▶ La bataille de la livraison de repas
- ▶ L'obligation de transparence

Ces transformations sont analysées au niveau mondial, avec de nombreuses comparaisons internationales et un focus sur la France. Leurs perspectives d'évolution sont étudiées à l'horizon 2035.



TARIF DE L'ÉTUDE : 2 600 euros HT (3 120 euros TTC, TVA à 20 % incluse)*

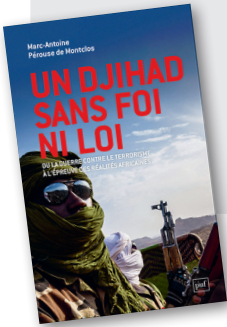
Ce tarif comprend :

- ▶ l'étude Vigie Alimentation 2022 en PDF
- ▶ la participation de deux personnes aux réunions trimestrielles du club Vigie Alimentation (auditions d'experts et d'acteurs sur des sujets de prospective choisis par les membres, veille sur les faits porteurs d'avenir)
- ▶ 1 à 10 accès réservés à la page Vigie Alimentation du site Futuribles

*Les membres partenaires de Futuribles International bénéficient de conditions privilégiées.

Contact : Aude Houguenague • E-mail : ahouguenague@futuribles.com • Tél. : + 33 (0)1 53 63 37 73
Site Internet : <https://www.futuribles.com/folder/vigie-alimentation-2/>

Analyses critiques & comptes rendus*



PÉROUSE DE MONTCLOS Marc-Antoine

Un Djihad sans foi ni loi. Ou la guerre contre le terrorisme à l'épreuve des réalités africaines

Paris : Presses universitaires de France, octobre 2022, 240 p.

Dans la continuité de ses précédents ouvrages, le politologue Marc-Antoine Pérouse de Montclos s'intéresse à l'engagement djihadiste en Afrique et propose d'en expliquer les ressorts. Loin des approches globalisantes, qui voient dans le *djihad* un phénomène mondial et interconnecté, il enracine les insurrections africaines, sahéliennes comme somaliennes, dans des réalités beaucoup plus locales. À suivre l'auteur, l'engagement djihadiste est une trajectoire que l'endoctrinement religieux n'explique que partiellement. Les motifs d'engagement sont pluriels et s'enchevêtrent dans des combinatoires singulières et locales : les défaillances de la gouvernance locale, l'absence de justice et le sentiment d'impunité des auteurs de troubles, qu'ils soient insurgés ou non, les inégalités d'accès aux ressources financières ou symboliques.

Tous ces éléments, comme les motivations religieuses, peuvent peser sur l'engagement individuel dans des groupes combattants. Partiellement cependant, car chaque situation est, nous dit Marc-Antoine Pérouse de Montclos, à appréhender dans une dynamique à la fois individuelle et collective. En analysant les ressorts de la violence, l'ouvrage devrait aussi permettre d'appréhender ce qui serait susceptible d'en éloigner les acteurs impliqués. Autrement dit, mieux comprendre l'engagement, c'est également se donner les moyens de mieux lutter contre, sachant que les stratégies mobilisées jusqu'à aujourd'hui — la déradicalisation plutôt que la négociation avec les groupes armés — ne semblent pas faire preuve d'une grande efficacité sur le terrain.

Marc-Antoine Pérouse de Montclos nous propose ainsi une description minutieuse de

*Les analyses publiées dans cette rubrique sont issues des publications « Lu, vu, entendu » de *Futuribles International*, accessibles sur la page : https://www.futuribles.com/publications/?filter_category=40/ (NDLR).

situations localisées, coexistantes et indépendantes les unes des autres, qu'il réinscrit dans un temps plus long que celui de la lutte contre les groupes insurrectionnels. L'auteur, au fil des chapitres, insiste : les révoltes et leurs principaux ressorts ne sont pas nés avec AQMI (Al-Qaïda au Maghreb islamique) et l'EIGS (l'État islamique dans le Grand Sahara) ; beaucoup existaient déjà du temps de la colonisation et des guerres insurrectionnelles et contre-insurrectionnelles. Cette réinscription du *djihad* africain dans une trajectoire historique déconstruit les explications monolithiques les plus courantes de l'engagement djihadiste :

1. Le religieux n'explique pas tout, la dimension religieuse de l'engagement et de la radicalisation sont bien souvent discutables. De plus, le fait religieux ne peut pas être correctement appréhendé dans un cadre qui réduit l'espace religieux à une opposition entre un islam radicalisé, wahhabite ou salafiste, et un autre tolérant, malékite ou soufi.

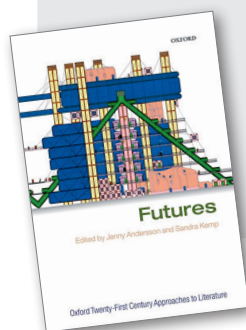
2. La violence n'est pas le fait des seuls groupes insurrectionnels : les armées régulières africaines tuent plus qu'elles ne protègent et beaucoup plus que les groupes armés. Les exactions des armées régulières commises sur les civils sont d'ailleurs l'un des ressorts

de l'engagement des populations auprès des groupes insurgés.

3. Les opérations des armées étrangères et les interventions des partenaires du développement ne sont pas efficaces : si elles décapitent les groupes et les privent parfois de leur *leader*, elles se heurtent à beaucoup trop d'obstacles — mauvaise communication avec les populations civiles sur le terrain, friction avec les armées des pays hôtes sur les stratégies à mobiliser, autres facteurs — pour réduire les insurrections.

Car enfin, nous dit l'auteur, si les motifs des conflits sont locaux et tiennent le plus souvent à la corruption des gouvernants et aux violences des troupes en uniformes, c'est plutôt à cette échelle qu'il convient d'agir pour désamorcer des conflits qui s'enracinent dans le ressentiment et se traduisent, pour les combattants insurgés comme pour les soldats ou les milices chargées de les combattre, par une criminalisation croissante des affrontements. Après *L'Afrique, nouvelle frontière du djihad ?* (Paris : La Découverte, 2018) et *Une Guerre perdue. La France au Sahel* (Paris : JC Lattès, 2020), Marc-Antoine Pérouse de Montclos livre ici une analyse rationnelle et clef des conflits en cours, pour qui souhaiterait rechercher de nouvelles options de sortie de crise. ■

Thierry Hommel



ANDERSSON Jenny / KEMP Sandra
(sous la dir. de)

Futures

Oxford : Oxford University Press (Oxford Twenty-First Century Approaches to Literature), octobre 2021, 576 p.

Dans ce nouveau livre codirigé avec l'universitaire

Sandra Kemp, l'historienne Jenny Andersson retrouve un de ses thèmes de recherche principaux : les études sur le futur (*futures studies*). Ce recueil réunit 30 chercheurs issus en majorité des sciences sociales, qui livrent un panorama complet des formes de réflexion sur le futur (*futures-thinking*) et l'avenir (*futurity*). Il est structuré en cinq parties thématiques. Chacune est présentée ici au travers d'un article particulièrement représentatif ou important.

Dans la première partie, « *Future Histories* [Les histoires du futur] », l'historien Rüdiger Graf définit quatre modes de production du futur qui ont constitué le processus de pluralisation du futur au XX^e siècle, surtout depuis les années 1970. Si certains ont dominé par moments, aucun n'en a supplanté un autre. Le futur est donc devenu complexe, hétérogène et pluriel. Au futur linéaire qui s'incarne dans des « futurs d'attente » tels que le libéralisme et le socialisme au XIX^e et au début du XX^e siècle, se sont ajoutés au lendemain de la Première Guerre mondiale des « futurs planifiés », prépondérants jusqu'aux années 1960. Les futurs planifiés partagent avec

les futurs d'attente une conception linéaire et progressive du temps, tout en mettant l'accent sur le besoin de façonner le futur. Depuis les années 1970, face aux conséquences écologiques de la civilisation industrielle, sont apparus les « futurs de conservation », portés par des groupes influents qui ont cessé d'envisager l'avenir comme nécessairement meilleur et tiennent à préserver ce qui existe, tandis que face aux erreurs de la planification émergeaient les « futurs de l'incertitude » des prospectivistes selon lesquels le futur recèle une multitude de possibilités.

Dans la deuxième partie, « *Knowing the Future* [Connaissance du futur] », la prospectiviste Jennifer M. Gidley revient sur les années 1960 et l'émergence du concept de futurs multiples. Celle-ci se confond avec l'histoire des idées de la seconde moitié du XX^e siècle et notamment la remise en cause du positivisme scientifique sous-tendant qu'il n'y aurait qu'un seul et vrai futur à cerner. La pluralisation du futur a permis à chacun d'imaginer des futurs alternatifs au *statu quo*, d'où sa démocratisation. Elle a fait évoluer les études sur le futur en tant que discipline académique, mais aussi les sciences sociales et la science en général.

La troisième partie, « *Futures as Salvation and Apocalypse* [Les futurs comme salut et apocalypse] », est consacrée au retour de formes de pensée messianique et apocalyptique souvent lié aux catastrophes annoncées par le changement climatique. L'anthropologue Arjun Appadurai souligne que le futur est à la fois en voie d'expansion, comme en témoigne le renouvellement de l'intérêt pour l'avenir dans les sciences sociales, et de rétractation sous le coup de la numérisation. Cet avenir inéluctable est régi par le nouveau monde des plates-formes numériques et des applications sur téléphones mobiles, qui fait que tout devient marchandise, même les relations sociales.

Dans la quatrième partie, « *Futures of Life* [Les formes futures de la vie] », le neuroscientifique Anders Sandberg montre que les transhumains radicalement augmentés représentent une telle rupture qu'ils restent une abstraction pour les hommes d'aujourd'hui. Afin d'avoir un aperçu concret de l'homme du futur, mieux vaut examiner les *exoselves* comme les montres, les *smartphones* ou *Wikipédia*, qui externalisent les connaissances, que les prothèses ou les exosquelettes qui modifient le corps.

Dans la dernière partie, « *Future Worlds* [Les mondes futurs] », R. John Williams, professeur de littérature comparée, examine comment la pluralité du futur est devenue un postulat de notre culture contemporaine. Au début des années 1950, le déterminisme

de Laplace a ressurgi du fait du développement de la puissance de calcul des ordinateurs permettant les prévisions de la météorologie, des trajectoires de bombes et de fusées ou des résultats d'élections. À la fin des années 1960, cette ère du *shut up and calculate* (tais-toi et calcule) a été progressivement supplantée par une futurologie non déterministe. Celle-ci s'ouvre sur la planification par scénarios dans un contexte d'émergence de la mécanique quantique, de la théorie du chaos et de la littérature postmoderne qui acte la fin des grands récits. Mais cette nouvelle futurologie est aussi marquée par la fascination vis-à-vis des spiritualités orientales (essor du bouddhisme tibétain ou du yoga par exemple), perçues comme la voie d'accès aux états quantiques et à leurs temporalités plurielles.

Certains thèmes de ce livre reviennent comme des *leitmotive* : la pluralité du futur et, à l'opposé, le rétrécissement ou la fermeture du futur, l'essor de l'intérêt pour la question du temps et du futur dans les sciences sociales, l'apport du *design* aux techniques traditionnelles de prévision, le changement climatique, le retour du millénarisme, la science-fiction ou encore le film *Black Panther* (2018).

Cinq essais sur trente se réfèrent à la pensée de l'historien Reinhart Koselleck [1923-2006]. Le nom de l'auteur de *Vergangene Zukunft* (*Le Futur passé*), paru en 1979 (Francfort-sur-le-Main : Suhrkamp), est lié à ce courant de l'Histoire nommé

Begriffsgeschichte (histoire des concepts) qui s'intéresse au sens des mots plutôt qu'aux événements qui relèvent de l'histoire sociale. Selon Koselleck, le concept de futur constitue la clef de voûte de l'histoire de la modernité occidentale. Le futur est entré en scène lors du passage de l'Ancien Régime aux Lumières ou modernité, période de libération de l'emprise de l'Église. L'invention du futur est liée aux idées modernes de progrès, d'accélération et de linéarité du temps. Les réponses ne doivent plus être cherchées dans un passé répétitif mais dans le futur, qui d'un problème de destinée divine est devenu un problème de rationalité scientifique et de volonté politique, les deux fondements de la vie politique moderne. Cette grande ouverture a libéré les horizons de l'humanité marquant le commencement de l'Histoire. Tandis que la fin prochaine des temps projetée par les visions apocalyptiques du christianisme était abandonnée en faveur d'une histoire qui se poursuit indéfiniment, le futur est apparu comme ouvert aux prévisions, à la planification et donc au contrôle.

De fait, la « scientification » du futur lors de cette transition a consisté à remplacer une forme de pouvoir (autorités religieuses) par une autre (État), ce que Koselleck décrit comme « la fermeture d'un futur dangereusement ouvert ».

Koselleck a aussi considérablement enrichi la notion de temps historique. La tension ou la distance entre passé et futur (ou entre le « champ d'expérience » des individus et leur « horizon d'attente ») peut permettre de saisir le temps de l'Histoire. Ce temps n'est ni figé ni monolithique, il est fait de temporalités sociales multiples. Il n'y a donc pas d'Histoire linéaire et totale, conception encore souvent dominante.

Ainsi, ces dernières années, les approches historiographiques du futur sont passées de la conception du futur comme problème dans l'histoire des concepts, au futur comme moyen de création et d'organisation d'un monde nouveau. Cet ouvrage foisonnant rend bien compte de cette évolution. ■

Corinne Roëls



GAUDART Corinne / VOLKOFF Serge
Le Travail pressé
Pour une écologie des temps de travail
Paris : Les Petits Matins, septembre 2022, 208 p.

C'est un voyage dans le temps très actuel que nous

proposent Corinne Gaudart et Serge Volkoff dans cet ouvrage qui se nourrit d'exemples collectés

lors d'observations de terrain pour mettre en évidence l'importance des multiples dimensions temporelles du travail. Les auteurs, tous deux ergonomes, s'appuient sur les éléments collectés lors d'interventions (les leurs ou celles de collègues) dans différents secteurs d'activités pour montrer en quoi ces dimensions sont déterminantes pour la qualité du travail, mais aussi en raison des effets sanitaires sociaux induits.

La première dimension à laquelle on pense, notamment en lisant le titre du livre, est celle de l'intensification du travail. Les auteurs décrivent donc, dans un premier temps, le « modèle de la hâte » qui s'est emparé du monde du travail et qui combine :

— Des contraintes « industrielles », héritées de l'organisation scientifique du travail et du taylorisme, qui se sont progressivement répandues dans les services et les administrations. Ainsi, la proportion de salariés dont le rythme de travail est imposé par « des normes ou délais en une heure au plus » est passée de 5 % à 29 % entre 1984 et 2016.

— Des contraintes « marchandes », liées aux relations avec le public, les clients, les usagers, dont il faut traiter les demandes et chercher la satisfaction. Sur la même période de 1984 à 2016, la part de salariés dont le rythme de travail dépend d'une « demande extérieure exigeant une réponse immédiate » est passée de 28 % à 58 %.

— Une dépendance : la part de ceux dont le rythme tient à une

« dépendance vis-à-vis des collègues » est passée de 11 % à 29 %, révélant la montée des contraintes dites « domestiques » liées à la nécessité de se rendre disponible pour répondre aux sollicitations provenant des équipes, des *managers*.

Au-delà de cette emprise temporelle immédiate qui impose de faire vite, de s'interrompre, de répondre instantanément, accentuée par les dispositifs de contrôle, les auteurs observent aussi celle, plus large, des horaires. Le constat est celui d'une expansion des horaires atypiques : horaires décalés, irréguliers ou fractionnés, travail de nuit, en soirée ou le *week-end...*, les temps de repos devenant de moins en moins collectifs. Ils traitent aussi la question du temps long, celui des carrières et des trajectoires professionnelles, venant ainsi éclairer un débat très actuel sur l'âge de départ en retraite.

À travers les descriptions de très nombreuses situations de travail concrètes, observées dans des métiers variés de tous secteurs, de la sidérurgie à l'horticulture, en passant par l'automobile, le BTP (bâtiment-travaux publics), la pâtisserie ou les caisses de sécurité sociale, les auteurs montrent l'importance des dimensions temporelles dans le travail, et les dégâts que peut provoquer leur non-prise en compte dans les modalités de gestion de l'activité. Les exemples retenus sont souvent positifs, mettant en évidence les stratégies collectives et individuelles des travailleurs pour trouver les solutions

permettant de réaliser les tâches qui leur incombent, dans le temps imparti, sans rogner sur la qualité et en préservant leur santé. Pour tenir la cadence, l'ouvrier expérimenté sait anticiper, en préparant les pièces dont il aura besoin plus tard, mais encore faut-il qu'il dispose des marges de manœuvre lui permettant ces adaptations. De même, les échanges entre pairs permettent une appropriation plus efficace d'un nouveau logiciel, la condition étant que l'organisation du service rende possibles ces temps d'échanges et que les changements ne soient pas permanents.

Cette question des contraintes de temps est également appréhendée au regard des carrières professionnelles. Les données statistiques montrent qu'au-delà de 50 ans, et surtout après 60 ans, les conditions d'exposition changent, avec moins d'exigences de cadences élevées, moins de travail de nuit et plus de travail à temps partiel. Le maintien en activité des seniors suppose donc un amé-

nagement de leurs temps de et dans le travail pour rendre celui-ci soutenable. Les auteurs montrent qu'une gestion intelligente des fins de carrière, permettant de valoriser et de partager les savoirs des salariés les plus expérimentés, est possible et favorable à l'entreprise. Elle permettrait de faire en sorte que les cessations d'activité ne soient pas motivées uniquement par une nécessaire mise en retrait d'un travail devenant insupportable pour les travailleurs vieillissants.

Cet ouvrage apporte une contribution intéressante aux débats actuels sur les questions de travail et de retraite. Son originalité repose sur le regard que portent les ergonomes sur l'activité de travail. Il est illustré par de très nombreuses descriptions de situations de travail concrètes, dont certaines mériteraient un traitement sous forme de documentaire vidéo nous permettant de voir et d'entendre les rythmes du travail. ■

Marc Malenfer



ATTALI Jacques

Histoires et avenir de l'éducation

Paris : Flammarion, novembre 2022, 480 p.

Dans un flot incessant de débats sur l'avenir de l'éducation — souvent limités à des opinions partisans plutôt qu'alimentés de considérations

éclairées —, Jacques Attali a l'ambition de nous réconcilier avec un sujet ô combien piégé, celui du sens, des finalités et de l'avenir de l'éducation. Non par allégation de poncifs dont nous sommes abreuvés jusqu'à plus soif par certains

pseudo-penseurs du moment, mais par un retour aux sources de ce qui a fait que l'humanité s'est emparée de la construction des savoirs, des cultures, des idéologies, des techniques et des mœurs, et a tenté d'organiser leur transmission à sa descendance.

En nous décrivant, au détour d'une revue de question historique interculturelle documentée, les cheminements qui ont progressivement abouti à la constitution de systèmes éducatifs, il nous permet de mesurer leur fonction politique. De la création en Mésopotamie du premier système d'écriture cunéiforme à nos jours, il illustre avec minutie combien la transmission du savoir et des connaissances est indissociable d'une vision sélective au profit d'élites, combien elle participe de la répartition et de l'exercice du pouvoir — et donc de ses dérives comme de ses manipulations. Sans omettre de relever en quoi, dans leur genèse, les systèmes éducatifs ont invariablement été destinés à transmettre des valeurs, ici religieuses, là militaires, l'auteur nous entraîne ensuite dans une mise en perspective de l'évolution de l'éducation dans ses finalités sociales et économiques, emblématiques du XIX^e siècle.

« Le savoir transmis est toujours celui qui protège l'ordre existant, presque jamais celui qui pousse à se rebeller, à changer, à remettre en cause, à penser autrement. » C'est ainsi que Jacques Attali ouvre le chapitre intitulé « Transmettre les exigences du capital », chapitre qui pourra sembler, à

certaines lectures, de portée quasi révolutionnaire. Les rapprochements et les divergences entre les modèles éducatifs français et les autres nous montrent en effet à quel point, en ce siècle de l'instruction publique gratuite, laïque et obligatoire, « le lien entre croissance et éducation commence à devenir évident », à quel point il a semblé temps de « produire des diplômés à la chaîne » pour faire fonctionner les prémises d'une économie que l'on ne qualifie pas encore mais que l'on pressent mondialisée...

Selon l'auteur, le XX^e siècle se distingue, en ce qui le concerne, par la mise en œuvre de politiques de massification de l'enseignement selon différents modèles, chacun caractéristique des contextes sociaux nationaux qui le soutiennent. Majoritairement, ces politiques se sont souvent décidées au détriment de la qualité des pratiques éducatives et des besoins des apprenants. Seules des préoccupations d'ordre économique vont s'imposer, au mépris parfois de la fonction inclusive de l'enseignement.

Jacques Attali ne se prive pas, à ce titre, d'instruire le procès du système français d'enseignement national. Il juge la situation du pays particulièrement préoccupante, notamment du fait de certains de ses choix idéologiques — parfois étayés par des théories pseudo-scientifiques improvisées — et de leur impact sur les performances d'une Éducation nationale peu encline à l'innovation. En France, les résultats des élèves se situent

aux antipodes, mentionne l'auteur, de ceux de pays comme la Finlande qui ont choisi de privilégier le bien-être des élèves, de susciter sans précipitation l'éveil des aptitudes, la créativité, en privilégiant l'interactivité, la collaboration avant toute idée de systématisation des apprentissages. Résultat ? La Finlande peut s'enorgueillir d'être dotée du « meilleur système éducatif mondial », rappelle-t-il. En tout cas le plus performant aux yeux de PISA (le Programme international pour le suivi des acquis des élèves).

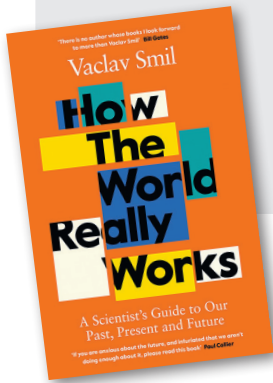
Finalement, que conclure de ces chapitres d'histoire de l'éducation et des constats qu'ils relèvent ? Peut-on en extraire quelques invariants qui permettraient de discerner ce que pourraient devenir les modes de transmission des savoirs dans le futur ?

Jacques Attali nous propose, dans un chapitre intitulé « Demain : *Homo barbaricus* ou *Homo hypersapiens* », une liste quasi exhaustive de leçons du passé utiles à notre compréhension pour éviter l'écueil d'un risque dystopique de « deux cauchemars » : celui de l'effondrement des systèmes éducatifs, et celui de l'entrée de l'humanité dans une civilisation où l'humain serait réduit à un simple « artefact bourré d'artefacts ». Préconisant l'élaboration d'un « Code mondial de l'enfance », l'auteur conclut son chapitre en appelant de ses vœux la naissance « de quelque chose comme un réseau global d'intelligences individuelles constitutives d'une nouvelle intelligence collective », susceptible de faire

naître une « hyperconscience ». Et comme Jacques maîtrise admirablement l'Attali, il ponctue son propos d'un point d'orgue énonçant « vingt recommandations pour le monde », « vingt recommandations spécifiques pour la France » et « vingt recommandations spécifiques pour le lecteur », d'autres encore pour les parents..., et pour ses lecteurs en général.

On ne peut que se réjouir d'avoir en mains un ouvrage qui fera référence non seulement pour sa richesse historique mais surtout pour sa clairvoyance : un système éducatif n'existe jamais indépendamment des intentions implicites des acteurs politiques et sociaux qui le décident. Il se définit ensuite par sa logique interne autant que par l'attente sociale qui pèse sur lui. Au travers de cette fresque historique, Jacques Attali réussit à nous alerter sur le fait que, plus que jamais, l'éducation à la française traverse une zone de turbulences : en proie à une crise existentielle, son modèle mérite d'être préservé si et seulement si il est capable de renouer avec ses objectifs initiaux, qu'il a trop souvent détournés, et ce quelle que soit la volonté de ses concepteurs. Car lorsqu'on analyse de près les grands principes pédagogiques de l'école de Jules Ferry, on ne peut qu'admirer leur cohérence avec le projet politique qui les a mis en place. Constat qui reste à méditer, notamment dans un moment de contre-performance avérée des dernières réformes de l'Éducation nationale... ■

Jean-Pierre Bellier



SMIL Vaclav

How the World Really Works: A Scientist's Guide to Our Past, Present and Future

Londres : Viking, janvier 2022, 336 p.

Pourquoi avous-nous besoin d'un livre sur le « fonctionnement du

monde » s'interroge dans son introduction son auteur, Vaclav Smil, professeur émérite à l'université du Manitoba au Canada, auquel on doit des ouvrages qui font autorité sur l'histoire de l'énergie ? Sans doute, affirme-t-il, parce que la complexité du monde actuel urbanisé, mécanisé, utilisant massivement des énergies fossiles, nous fait oublier que nos sociétés se sont développées en s'appuyant sur quatre piliers – l'ammoniac, l'acier, le ciment et les plastiques – dont l'empreinte carbone est importante, et que la lutte contre le changement climatique devra tenir compte de cette réalité.

La compréhension de l'énergie, de la production de notre alimentation et du monde matériel est indispensable pour appréhender la réalité et l'auteur lui consacre les trois premiers chapitres du livre. Il rappelle que la principale source d'énergie a été pendant longtemps la traction animale et que celle-ci, après les perfectionnements apportés à la machine à vapeur par James Watt à la fin du XVIII^e siècle, a connu une véritable mutation après 1850 : en 1900,

le charbon et le pétrole représentaient la moitié de l'énergie primaire mondiale et en 1950, les trois quarts. L'électricité est un vecteur énergétique majeur qui a de nombreux avantages, son utilisation conditionnant bien des aspects de la vie moderne (sans pompes électriques, pas d'eau dans les villes...) ; la décarbonation de sa production est un point clef qui ne progresse que trop lentement : elle était encore produite, en 2020, pour moitié avec des énergies fossiles, le restant par les filières renouvelables et le nucléaire. L'énergie est certes un concept scientifique abstrait, mais l'augmentation de ses usages témoigne de la diversité de la réalité énergétique : aujourd'hui, un habitant de la planète dispose de 700 fois plus d'énergie que ses ancêtres du début du XIX^e siècle, avec de fortes inégalités mondiales de sa consommation par habitant, qui a triplé depuis la Seconde Guerre mondiale.

Selon la FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture), la part de la population mondiale qui est sous-alimentée est passée de 65 % en 1950 à 15 % en l'an 2000. On doit cette « performance » à des progrès des variétés végétales, de l'irrigation et de la fertilisation des sols. Mais aussi à un usage intensif

de l'énergie dans des engins agricoles, la production des engrais, les bateaux de pêche et l'industrie agroalimentaire. Quelques chiffres le montrent : l'agriculture utilise 220 millions de tonnes par an d'engrais émetteurs de gaz à effet de serre ; l'énergie (depuis la culture du blé jusqu'au four du boulanger) contenue dans un kilogramme de pain est équivalente à celle d'un quart de litre de gazole ; la consommation liée à l'élevage d'un bar bat tous les records énergétiques avec 2 à 2,5 litres de gazole par kilogramme. Pouvons-nous continuer avec ces méthodes alors que la population de la planète va encore croître ?

La réponse n'est pas évidente car on peut certes cultiver des légumineuses qui, en fixant l'azote atmosphérique, remplaceraient des engrais, et limiter la mécanisation, mais les rendements diminueraient. Il est indispensable, enfin, de comprendre le monde matériel et Vaclav Smil montre que les quatre piliers sur lesquels repose la civilisation moderne, l'ammoniac pour la production d'engrais, le ciment omniprésent dans les villes (la Chine en produit 2,2 milliards de tonnes par an), l'acier et les matériaux plastiques de nos voitures, sont des gros consommateurs de carbone et que leur production est fortement émettrice de gaz à effet de serre. Il ajoute à sa liste le silicium des puces électroniques, produit encore souvent avec de l'électricité carbonée, et les batteries électriques, lestées chacune de 100 kg de métaux critiques dont l'extraction a un impact sur l'environne-

ment. La réalité est qu'il n'existe pas encore de procédé pour produire ces matériaux à grande échelle sans émettre de carbone.

La forte croissance du commerce international, stimulée par la mise en service de navires porte-conteneurs et le transport aérien du fret, celle des investissements des entreprises à l'étranger, et la diffusion des technologies (en particulier celles de l'information) ont contribué à une interconnexion des régions du monde, qualifiée de « globalisation ». Celle-ci, rappelle Vaclav Smil, a des racines historiques, les pays s'ouvrant au commerce international avec des avancées et des reculs, et doit beaucoup au progrès technique (depuis l'invention de la machine à vapeur et, plus récemment, celle du transistor). L'entrée en scène de la Russie, de l'Inde et de la Chine a accéléré le mouvement, mais la crise sanitaire provoquée par la Covid-19 change peut-être la donne. L'auteur ne fait pas de pronostic, mais il estime que la globalisation a peut-être atteint son pic.

Cette épidémie le conduit à une réflexion sur les risques encourus par la planète, dont la liste est longue : outre les épidémies, on y trouve les régimes alimentaires trop caloriques, les accidents nucléaires, les accidents domestiques ou routiers. Des catastrophes naturelles, souvent spectaculaires, pourraient-elles faire disparaître notre civilisation ? L'auteur ne l'imagine pas, mais sans trop vouloir inquiéter ses lecteurs, il estime néanmoins qu'il ne faut pas totalement

exclure qu'un astéroïde percutant la Terre y produise d'immenses dégâts. Il termine cette évaluation en soulignant que nous n'avons qu'une seule biosphère et que le réchauffement climatique dont nous comprenons parfaitement les causes (les émissions incontrôlées des gaz à effet de serre) la déséquilibre. Notre inaction est coupable, mais la planète est sur une corde raide, elle doit lutter contre le réchauffement climatique tout en donnant les moyens aux pays les plus pauvres d'accéder à la modernité. Il faut se garder des vœux pieux en tenant compte des réalités (limiter le réchauffement de la planète à 1,5 °C ne lui paraît ainsi pas réaliste) et des solutions techniques possibles, mais en étant conscient qu'elles auront un coût économique et social considérable.

En guise de conclusion, Vaclav Smil nous invite à « comprendre » le futur. Il ne rejette ni la prospective, ni l'utilisation de scénarios (mais il n'en propose pas) et de modèles technico-économiques (mais certains sont souvent irréalistes, comme par exemple les prévisions trop optimistes des années 1950 sur l'énergie atomique). Compte tenu des réalités,

il estime que l'avenir de la planète se situera entre l'« apocalypse », décrite par certains prévisionnistes, et la « singularité », c'est-à-dire l'avènement d'une civilisation où des machines « intelligentes » apporteraient une solution à tous les problèmes de la planète (le mythe transhumaniste de la Silicon Valley). Il invite les décideurs à tenir compte des réalités matérielles, en particulier des potentialités des techniques énergétiques, des verrous qu'il faudrait faire sauter, mais aussi des expériences historiques (quelles leçons retirons-nous des épidémies récentes ?). Le futur, conclut Vaclav Smil, sera probablement un âge hybride marqué par des succès et des échecs.

Le lecteur ne trouvera pas, dans ce livre, des recettes pour faire face aux crises, mais une description toujours claire de la réalité, illustrée par des exemples avec d'utiles données, qui l'aideront à porter un jugement sur la pertinence et la faisabilité des scénarios, qu'il s'agisse de la transition énergétique et plus généralement des politiques publiques (avenir de l'agriculture, de la santé, etc.). ■

Pierre Papon



COULANGEON Philippe / DEMOLI Yoann / GINSBURGER Maël / PETEV Ivaylo

***La Conversion écologique des Français
Contradictions et clivages***

Paris : Presses universitaires de France, janvier 2023, 272 p.

Cet ouvrage très documenté explore un désir social et politique complexe et particulièrement mal connu : le désir d'écologie. Pour le cerner, les auteurs se fondent sur l'enquête SVEN (Style de vie et environnement) menée en partenariat par Sciences Po, le CREST (Centre de recherche en économie et statistiques) et le CNRS (Centre national de la recherche scientifique), publiée en 2018 et à laquelle plusieurs d'entre eux ont participé. Mais ils s'appuient aussi sur la compilation d'un grand nombre d'études qui concernent à la fois la conscience écologique des Français et l'évolution de leurs pratiques environnementales.

L'analyse se déploie en croisant les indicateurs de « conversion écologique » — déclaratifs ou comportementaux — avec les critères d'âge, de genre, de catégorie sociale, d'orientation politique et de localisation géographique. Son apport fondamental consiste à distinguer, dans la notion de « conversion écologique », trois composantes qui apparaissent, à l'analyse, assez peu corrélées : la prise de conscience environnementale ; la frugalité des comportements (subie ou choisie) ; la méfiance vis-à-vis du progrès technique et des acteurs qui s'en

réclament, qu'ils soient privés ou publics.

Cette clef d'analyse permet aux auteurs de remettre en cause quelques idées reçues :

— La prise de conscience des défis écologiques n'est plus l'apanage d'une catégorie de privilégiés (les fameux bobos urbains). Elle est désormais assez bien partagée dans toutes les catégories sociales, à l'exception des plus pauvres.

— Cette prise de conscience est de moins en moins corrélée avec les orientations politiques. En revanche, la méfiance vis-à-vis du progrès est nettement plus forte à gauche. Elle se polarise en particulier aux extrêmes, y compris du côté de l'extrême droite.

— Les femmes sont plus « écolo-converties » que les hommes, en ce qui concerne tant la prise de conscience que les changements de pratiques, notamment alimentaires. Mais ces changements sont plus souvent motivés par un « désir de santé » que par des considérations climatiques et planétaires.

— Les jeunes générations ne sont pas plus « écolo-converties » que celles qui les précèdent. La notion de « génération climat » ne correspond pas à une réalité.

L'usage de l'analyse factorielle permet aussi aux auteurs d'affir-

ner la segmentation de la population française par rapport aux questions écologiques : Les « consuméristes assumés » font peu de cas de l'écologie ; les « éco-consuméristes » mettent en accord leurs choix de vie avec leur conscience écologique ; les « éco-cosmopolites » combinent frugalité au quotidien, convictions écologiques et voyages multiples et lointains ; les « frugaux sans intention » sont économes par nécessité ou par habitude, plus que par conviction.

Ce livre fait écho, avec un an de décalage, au *Mémo sur la nouvelle classe écologique*, livre testament du regretté Bruno Latour¹. Tout en confirmant la montée en puissance d'une « conscience écologique », il invite à douter de l'émergence d'une « nouvelle classe écologique » qui serait homogène et structurée politiquement.

La « conversion écologique des Français », avec ses contradictions et ses clivages, tend plutôt à se cristalliser dans différentes options qui apparaissent peu compatibles entre elles : le salut par l'innovation technique, l'encadrement strict des modes de vie, la décroissance.... Elle risque plutôt de nourrir les débats qui opposeront les formations politiques existantes sur la question des « chemins de la transition ». Ces chemins, théorisés récemment sous forme de scénarios par des organismes comme l'ADEME (Agence de la transition écologique) ou RTE (Réseau de transport d'électri-

cité)², impliquent en effet, dans des proportions très variables, le volontarisme politique, le recours au progrès technique et la modification des comportements.

Dans un contexte d'éco-anxiété partagée, la question du « pourquoi l'écologie ? » fera sans doute de moins en moins débat. En revanche, celle du « comment l'écologie ? » risque fort de se trouver au cœur de nombreuses controverses, notamment celles qui concerneront l'urbanisme, les pratiques agricoles, les pratiques alimentaires, les outils et infrastructures de la mobilité, le recours aux énergies renouvelables ou l'aménagement des territoires.

Ce livre pourra utilement contribuer à affranchir ces controverses des présupposés idéologiques, clichés et idées reçues qui les parasitent trop souvent aujourd'hui. Il devrait être lu de toute urgence par les états-majors des partis politiques et par les *think-tanks* qui les conseillent. Il leur permettra de mesurer les écarts — parfois abyssaux — qui séparent leurs offres politiques des attentes réelles des Français concernant l'écologie. Il intéressera les responsables et cadres des nombreuses entreprises qui ont choisi de déployer des « argumentaires écolos » à destination de leurs actionnaires, de leurs clients, de leurs fournisseurs ou de leurs salariés. Un livre, donc, d'utilité publique. ■

Jean Haëntjens

1. Paris : La Découverte, janvier 2022.

2. Notamment présentés dans PAPON Pierre, « La transition énergétique à l'heure des choix », *Futuribles*, n° 447, mars-avril 2022, p. 21-34.

futuribles

No.453 • March-April 2023

The Five Barriers to Artificial Intelligence

Bertrand Braunschweig

The launch in late November 2022 of ChatGPT, a conversational agent (chatbot) developed by OpenAI, received a great deal of attention and has prompted a lot of reporting and commentary on the performance of, and advances made by, artificial intelligence (AI). And yet, though progress in this area is indeed impressive, a number of limits remain and the emergence of a totally autonomous, perfect AI still lies in the realms of science-fiction. For example, Bertrand Braunschweig, in charge of the scientific coordination of the French programme 'Confiance.ai', points here to five major 'barriers' that could well hinder its development if insufficient attention is paid to them. He writes of these here: they have to do with trust in AI, its energy consumption, the safety of the systems controlled by AI, human-machine interactions and, lastly, the inhumanity of machines. In closing, he suggests a number of lines of work and research for meeting the challenges posed by the five barriers: improving network architecture, combining digital and symbolic models, increased interdisciplinarity and other measures.

Decarbonizing Mobility Seven Scenarios for France to 2040 and 2060

*Dominique Auverlot
and Alain Sauvant*

France Stratégie and the French General Inspection for the Environment and Sustainable Development (Inspection générale de l'environnement et du développement durable; IGEDD) have jointly carried out a foresight study on transport and mobility up to the years 2040 and 2060, with a view to meeting the carbon neutrality target that France has set for itself.

Within this framework, seven scenarios were produced, incorporating both the mobility of persons and goods; five scenarios do not assume the objective of carbon neutrality as given from the outset and are, therefore, more exploratory (forecasting scenarios); two so-called 'backcasting' scenarios operate on the assumption that the carbon neutrality of transport must be achieved.

Dominique Auverlot and Alain Sauvant, who coordinated this exercise, detail its characteristics here (approach, methodology etc.) and the major lessons to be drawn from the seven scenarios. These range from one that is a little more optimistic than the trend scenario to others that are very ambitious, either in terms of voluntary self-restriction or technological solutions. It emerges that only the two backcasting scenarios, which incorporate carbon neutrality into the

very way that they were framed, actually achieve it. Armed with this finding and the various costings arrived at in this foresight exercise, the authors also present nine key messages aimed at political decision-makers, so that they are equipped with the essential elements for setting the transport sector (by road, air and sea) and mobility more generally on the path to genuine decarbonization. In a second article published in this issue, they round off their analysis by focussing on the most relevant technologies for fostering this decarbonization of transport.

Which Technologies for Decarbonizing Transport?

*Dominique Auverlot
and Alain Sauvant*

In their article also published in this issue, Dominique Auverlot and Alain Sauvant present the foresight exercise carried out by France Stratégie and the French General Inspection for the Environment and Sustainable Development (Inspection générale de l'environnement et du développement durable; CGEDD) on transport and mobility up to the years 2040 and 2060, with a view to meeting the carbon neutrality target that France has set for itself. To round off that presentation and give a concrete example of the arrangements that might foster this transition toward carbon neutrality, they propose here a focussed study of the technologies to be brought to bear on decarbonizing transport.

Transport is the main greenhouse-gas emitting sector in France today (30% of emissions); it therefore represents a key stage in ecological transition. In this article, Auverlot and Sauvant

present the technological options available for decarbonizing transport, beginning with the conversion of road transport vehicles to new (electrical, hybrid, hydrogen, biofuel or other) forms of energy. As they see it, there is no alternative for a strategy that aims to achieve carbon neutrality. With air transport, they see no option but to invest in research, favouring conversion to biofuels. Lastly, in maritime transport, the third branch of the sector, it is time to experiment, as this article shows, with two promising technologies: using liquid natural gas with CO₂ capture, and electricity for short journeys. In the end, if technology alone cannot solve all the emission problems created by transport, it is nonetheless one of the main levers to be used, alongside incentivizing self-restraint. The authorities must therefore take it into account in the political and economic incentives they set in place to implement their low-carbon strategy.

The New Silk Roads, Ten Years After

*Barthélémy Courmont,
Frédéric Lasserre and Éric Mottet*

A few months after Xi Jinping was reappointed leader of the Chinese Communist Party for a further five years and with diplomatic tensions rising on the world stage in a context of multiple crises (Covid, war in Ukraine, energy etc.), how do things stand with the great development initiative launched by Beijing in 2013? Ten years ago now, an ambitious project of investment in the infrastructure of multiple countries, the 'Belt and Road Initiative' (BRI) or 'New Silk Roads' was launched. In 2018 a long article by Rémi Perelman in these pages had outlined its genesis and nature and China's various aims for the project.

Barthélémy Courmont, Frédéric Lasserre and Éric Mottet take that analysis further. They provide an update here on this multifaceted BRI, which has enabled Beijing to forge various economic and strategic alliances and substantially change the geopolitical balance in the affected regions (Central Asia, Europe, Africa etc.), but whose initial – very ambitious – objectives have evolved, due in part to the economic slowdown and also to an at times negative perception of the initiative. Courmont *et al.* also stress the emergence of alternative projects launched by other countries (USA, Japan, EU etc.), aiming to compete with the BRI, and Beijing's concern to reshape its project for reasons of credibility: a BRI 2.0 is thus being rolled out. If it is to enjoy long-term success, this BRI 2.0., essential to a China whose economy has become highly dependent on the rest of the world, will have to both cope with sterner competition and avoid sending out an over-hegemonic image to its partners.

Company Recruitment Difficulties: A Comparative Economic Analysis

Antonin Bergeaud and Gilbert Cette

This article by Antonin Bergeaud and Gilbert Cette offers a comparative economic analysis of recruitment difficulties in the five largest Eurozone countries. We are first reminded that these difficulties are generally greater in the countries with low levels of unemployment (Germany, Netherlands) and, conversely, less significant in countries with a higher unemployment rate (Italy, Spain). They do, however, stress that France is atypical in this regard, since it has major recruitment difficulties even though the

rate of unemployment remains high. This attests, they argue, to a particular maladjustment between labour supply and demand, which may be caused by various different factors and differs between higher and lower skilled jobs. Among the lowest skilled, two main causes are identified: levels of pay and working conditions.

Working conditions, they argue, are a product of collective bargaining, which can only be good for social progress. On the other hand, when it comes to starting levels of pay, they stress – pointing particularly to vacancy rates – that these levels are not attractive enough in France by comparison with the transfer payments associated with unemployment. They therefore assert that reducing those transfer payments (unemployment insurance, income support, pensions), as is happening in various countries such as Denmark or Sweden, would improve the operation of the labour market in France and be economically beneficial. Their argument is at the heart of the debate prompted by the reform projects undertaken in recent months by the French government.

Human Rights or Energy – The Dilemma

Jean-François Drevet

It is now more than a year since Russia invaded Ukraine, prompting sharp reactions from Western countries, Europe included – reactions expressed in, among other things, a raft of economic sanctions. In the event, these sanctions, which relate particularly to the energy sector (Russia being the EU's prime fossil fuel supplier), have shown up Europe's extreme energy dependency. The defence of democratic values is not

negotiable, but it comes at a cost. And the alternatives for by-passing Russian energy are barely more virtuous, since most fossil fuel producers are to be found in the Middle East, in countries with such glowing human rights records as Iran, Saudi Arabia and Qatar... In fact, unless there is a renewed turn to nuclear power – and even coal – then, as we still await the

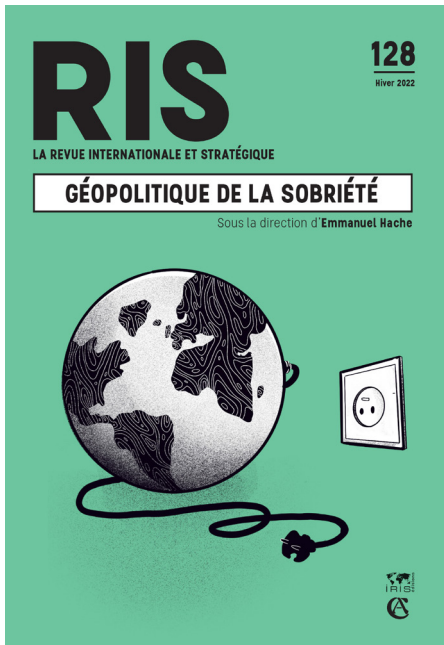
extensive development of renewable energies, the dilemma between the defence of democracy and freedom, on the one hand, and energy security, on the other, is likely to persist. This is what this latest European Chronicle shows us, rehearsing as it does the recent history of this dilemma and the prospects for its (non-)resolution in the medium term. ■

Futuribles is a bimonthly independent transdisciplinary policy oriented journal (6 issues a year), also available in electronic form on the Futuribles website.

Its objective is to provide its readers with a better understanding of contemporary societies dynamics, those facts, ideas and trends shaping their medium and long term possible futures.

Chief Editor: Hugues de Jouvenel

Futuribles • 47, rue de Babylone, 75007 Paris, France • Tel. +33 (0)1 53 63 37 70
E-mail revue@futuribles.com • Website www.futuribles.com



**CHAQUE
TRIMESTRE,
L'INTERNATIONAL
EN DÉBAT**

DISPONIBLE SUR
IRIS-FRANCE.ORG
EN LIBRAIRIE ET
SUR CAIRN



ABONNEZ-VOUS À *futuribles*

L'anticipation au service de l'action

Tous les deux mois, la revue *Futuribles* propose un décryptage des grands enjeux d'avenir



Au sommaire des derniers numéros

- ▶ « Le modèle économique chinois », de François Chimits | n° 452
- ▶ « Que faire des déchets radioactifs ? », de Julie de Brux et *alii* | n° 452
- ▶ « La population du monde : tendances et perspectives », d'Alain Parant | n° 452
- ▶ « L'impact du vieillissement sur les comptes sociaux », de Pierre-Yves Cusset | n° 451
- ▶ « Géopolitique de l'espace numérique », d'Henri d'Agrain | n° 451
- ▶ « L'évolution de l'espérance de vie dans les pays occidentaux », de Magali Barbieri | n° 450
- ▶ « Peut-on soigner le vieillissement ? », de Jean-Pierre Henry | n° 450
- ▶ « Le désir d'écologie, impensé de la transition », de Jean Haëntjens | n° 450
- ▶ « Les mouvements de résistance à la surveillance numérique », de Marie Ségur | n° 450

NOUVEAU

L'abonnement à l'édition imprimée inclut l'accès à l'édition numérique et aux archives depuis 1975

TARIFS EN PAGE 2

Commande / abonnement / information

Futuribles abonnements • 47 rue de Babylone - 75007 Paris - France

Tél. : + 33 (0)1 53 63 37 70 • E-mail : diffusion@futuribles.com

Site Internet : <https://boutique.futuribles.com//>

futuribles

L'anticipation au service de l'action

Mars-avril 2023 • numéro 453

- 3 | **Éditorial**
Atermoiements
Hugues de Jouvenel
- 5 | Les cinq murs
de l'intelligence artificielle
Bertrand Braunschweig
- 25 | Décarboner les mobilités
Sept scénarios pour la France
aux horizons 2040 et 2060
Dominique Auverlot et Alain Sauvant
- 43 | Quelles technologies
pour décarboner
les transports ?
Dominique Auverlot et Alain Sauvant
- 63 | Les nouvelles routes
de la soie, dix ans après
*Barthélémy Courmont, Frédéric Lasserre
et Éric Mottet*
- 77 | **Tribune**
Difficultés de recrutement
des entreprises : une analyse
économique comparative
Antonin Bergeaud et Gilbert Cette
- 89 | **Chronique européenne**
Droits humains ou énergie :
le dilemme
Jean-François Drevet
- 97 | **Actualités prospectives**
Le début de la fin de l'habitat
pavillonnaire en France ? ■ Existe-t-il
une alternative à la batterie lithium-
ion ? ■ Les Français et le travail ■
L'avenir radieux du fret aérien dans
nos achats ? ■ Fusion nucléaire :
quelles perspectives ?
- 111 | **Lu, vu, entendu**
Marc-Antoine Pérouse de Montclos,
*Un Djihad sans foi ni loi. Ou la guerre
contre le terrorisme à l'épreuve des réalités
africaines* ■ Jenny Andersson et Sandra
Kemp (sous la dir. de), *Futures* ■ Corinne
Gaudart et Serge Volkoff, *Le Travail
pressé. Pour une écologie des temps de
travail* ■ Jacques Attali, *Histoires et avenir
de l'éducation* ■ Vaclav Smil, *How the
World Really Works: A Scientist's Guide
to Our Past, Present and Future* ■
Philippe Coulangeon et alii, *La Conversion
écologique des Français. Contradictions
et clivages.*
- 125 | **Abstracts**

L 15817 - 453 - F: 22,00 € - RD



978-2-84387-468-0

