

# futuribles

*L'anticipation au service de l'action*

Janvier-février 2024 • numéro 458



## Science, technologies et société

La société face aux avancées scientifiques :  
intelligence artificielle et génétique

Publications scientifiques :  
la France dans le palmarès mondial

Prospective de l'insécurité minérale

L'énigme Oppenheimer

Pourquoi l'électricité est-elle plus chère ?

# 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](mailto:aabadie@ajustetitres.fr)

Information, modification de service ou réassort :  
[www.direct-editeurs.fr](http://www.direct-editeurs.fr)

Titre distribué par MLP

• En librairie : Futuribles - Tél. : + 33 (0)1 53 63 37 73  
E-mail : [ahouguenague@futuribles.com](mailto: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](mailto:revue@futuribles.com)  
Site Internet : [www.futuribles.com](http://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, Antoine Le Bec, 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](mailto:diffusion@futuribles.com) • Site Internet : <https://boutique.futuribles.com>

## Abonnement

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

	1 an - 6 numéros	2 ans - 12 numéros
<b>Abonnement</b> <i>1 utilisateur</i>	122 €	211 €
<b>Abonnement professionnel</b> <i>2 à 2 500 utilisateurs*</i>	297 €	514 €
<b>Enseignant, étudiant</b> <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
<b>Abonnement</b> <i>1 utilisateur</i>	115 €	199 €
<b>Abonnement professionnel</b> <i>2 à 2 500 utilisateurs*</i>	239 €	414 €
<b>Enseignant, étudiant</b> <i>Sur justificatif</i>	58 €	

Tarifs pour tout pays jusqu'au 31/12/2024, TVA 2,1% incluse.

\*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, Delphes, 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](mailto: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), Le Centorial, 18, rue du Quatre Septembre, 75002 Paris, France, tél. : + 33 (0)1 44 07 47 70, e-mail : [contact@cfcopies.com](mailto: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° 23050573 • JANVIER 2024

Illustration de couverture : © W. Phokin / Shutterstock

© *futuribles* SARL 2024

# futuribles

Janvier-février 2024 • numéro 458

---

- 3 | **Éditorial**  
Quelles ressources pour demain ?  
*Hugues de Jouvenel*
- 5 | Prospective de l'insécurité minérale  
Anticiper la nouvelle ère métallique de la transition bas-carbone  
*Emmanuel Hache*
- 25 | La société face aux avancées des sciences et des techniques  
Le cas de l'intelligence artificielle et de la génétique  
*Virginie Courtier-Orgogozo et Laurence Devillers*
- 45 | **Tribune**  
L'énigme Oppenheimer  
*Jean-Pierre Dupuy*
- 53 | Dynamique des publications scientifiques : le cas de la France  
*Agénor Lahatte et Frédérique Sachwald*
- 73 | Comparaisons statistiques dans le temps et l'espace  
Vertus et limites des données  
*Jean Baneth*
- 87 | **Futurs d'antan**  
Marcel Boiteux avait raison  
La concurrence en électricité augmente les prix  
*Lionel Taccoen*
- 95 | **Chronique européenne**  
L'Europe est-elle fragile ?  
*Jean-François Drevet*
- 103 | **Actualités prospectives**  
Ce que révèle le prix du Big Mac sur l'inflation | L'exploitation minière des fonds marins sur la sellette | Chine / États-Unis : fin et leçons de la guerre des puces | E-carburants : quel apport à la décarbonation du transport ? | Droit de la propriété intellectuelle et IA.
- 117 | **Lu, vu, entendu**  
Daniel Andler, *Intelligence artificielle, intelligence humaine : la double énigme* | Collectif, « Quelle université voulons-nous ? » | Ophélie Coelho, *Géopolitique du numérique. L'impérialisme à pas de géants* | Didier Billion et Christophe Ventura (sous la dir. de), « Vers une désoccidentalisation du monde ? » | RTE, *Bilan prévisionnel, édition 2023. Futurs énergétiques 2050 → 2023-2035 : première étape vers la neutralité carbone.*
- 133 | **Abstracts**

Futuribles abonnements • 47, rue de Babylone - 75007 Paris - France  
 E-mail : [diffusion@futuribles.com](mailto: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
<b>Abonnement</b> 1 utilisateur	<input type="checkbox"/> 122 €	<input type="checkbox"/> 211 €
<b>Abonnement professionnel</b> 2 à 2500 utilisateurs*	<input type="checkbox"/> 297 €	<input type="checkbox"/> 514 €
<b>Enseignant, étudiant</b> 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
<b>Abonnement</b> 1 utilisateur	<input type="checkbox"/> 115 €	<input type="checkbox"/> 199 €
<b>Abonnement professionnel</b> 2 à 2500 utilisateurs*	<input type="checkbox"/> 239 €	<input type="checkbox"/> 414 €
<b>Enseignant, étudiant</b> Sur justificatif	<input type="checkbox"/> 58 €	

## Je commande les numéros suivants de la revue *Futuribles*

n° 455     n° 456     n° 457     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.*

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

Tarifs pour tout pays jusqu'au 31/12/2024, TVA 2,1% incluse.

# Quelles ressources pour demain ?

*L'éditorial d'Hugues de Jouvenel*

---

Nous entrons dans une nouvelle année. J'adresse donc d'abord à nos lectrices et à nos lecteurs nos vœux les meilleurs pour que celle-ci soit pour eux aussi heureuse que possible, et qu'ils puissent être eux-mêmes les acteurs des changements auxquels ils aspirent.

Ce numéro de *Futuribles* part en fabrication alors que la 28<sup>e</sup> Conférence des parties à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (COP28) se trouve à mi-parcours et que les spéculations sur son issue vont bon train, en dépit de l'accord conclu le premier jour à Dubaï, sur le fonds « pertes et dommages » qui doit aider les pays les plus vulnérables à faire face au dérèglement climatique, largement imputable aux pays industrialisés. Reste à savoir comment ce fonds sera abondé et si les résolutions adoptées seront suivies d'actions. On observe en Europe qu'il n'en va pas toujours ainsi, même si celle-ci se prétend exemplaire en matière de transition écologique. Outre le fait que l'Union européenne reste dépendante aux énergies fossiles, la transition vers une économie décarbonée, qui a fait l'objet de plusieurs résolutions de ses institutions, exigerait, en effet, que l'Europe bénéficie d'une certaine autonomie en termes de matières premières et d'industrie. Or cela est loin d'être le cas, comme le reconnaissait d'ailleurs Ursula von der Leyen qui déclarait, en 2022, que « l'accès aux matières premières jouera un rôle décisif dans le succès de [la] transition vers une économie durable et numérique », et que « le lithium et les terres rares seront bientôt plus importants encore que le pétrole et le gaz ».

Dans son article sur « l'insécurité minérale », Emmanuel Hache montre combien les équipements bas-carbone comme le solaire, les batteries de véhicules électriques ou l'hydrogène, exigent de matières premières, elles-mêmes très convoitées par les autres pays industrialisés (notamment les États-Unis et le Japon). Des matières premières qui sont majoritairement contrôlées par la Chine (qu'elle les détienne ou les raffine) ou, parfois, par un petit nombre de pays (pouvant s'organiser en cartel), notamment en Amérique latine ou en Afrique, et dont l'exploitation peut donner lieu à des conflits aussi bien sociaux qu'internationaux... Il montre ainsi combien la planification stratégique impose une réflexion réellement systémique dont

la durée et le coût sont souvent sous-estimés. Faut-il en conclure que l'Europe, malgré ses résolutions, reste fragile ? La chronique européenne de Jean-François Drevet se penche sur la question.

L'article de Virginie Courtier-Orgogozo et Laurence Devillers souligne, quant à lui, combien les progrès des sciences et des technologies sont rapides au regard du temps nécessaire à la société pour bien les comprendre et les utiliser à bon escient. S'attachant en premier lieu à l'intelligence artificielle, elles en précisent utilement les caractéristiques et les limites, en rappelant la différence entre l'IA et l'intelligence humaine. Mais les autrices soulignent aussi son utilité comme outil sous réserve d'un usage raisonné. Abordant ensuite la génétique, elles rappellent d'abord que notre génome ne détermine pas notre destin, qui dépend très largement de notre environnement, puis évoquent les nouvelles techniques permettant de modifier l'ADN, là aussi en nous mettant en garde vis-à-vis de craintes et d'espoirs parfois extravagants.

Agénor Lahatte et Frédérique Sachwald montrent ensuite comment se situe la France à l'aune des publications scientifiques mondiales depuis 2010, à partir de différents indicateurs et par discipline. Ils montrent que ses performances sont médiocres dans des disciplines en forte croissance comme l'informatique et l'intelligence artificielle, et meilleures dans d'autres moins dynamiques (physique, mathématiques, sciences humaines), mais que le système français de recherche et d'innovation perd pied dans le classement, sans doute aussi en raison des performances remarquables d'autres pays, en particulier asiatiques. Nous reviendrons sur les causes de ce relatif déclin et les moyens de l'endiguer dans un prochain numéro.

Il faut reconnaître que les comparaisons statistiques sur longue période et dans l'espace, dont nous sommes friands lorsqu'on fait de la prospective, sont souvent sujettes à caution, surtout quand il s'agit de données monétaires et, par exemple, des parités de pouvoir d'achat. Jean Baneth, orfèvre en la matière, nous alerte sur leurs usages tandis que Lionel Taccoen montre, pour sa part, comment Marcel Boiteux nous avait opportunément alertés, dans un article publié en 2007 dans ces colonnes, sur le fait que l'ouverture à la concurrence de l'électricité allait se traduire par une augmentation de ses tarifs.

La nécessité de l'anticipation au service de l'action est de plus en plus évidente, mais les anticipations ne sont pas toujours justes, ni prises en considération. Et l'action ne s'inscrit pas systématiquement dans une vision à long terme désirable et consensuelle ; il est donc important que cette vision soit clairement exprimée et débattue. ■

# Prospective de l'insécurité minérale

## Anticiper la nouvelle ère métallique de la transition bas-carbone

Par Emmanuel Hache <sup>1</sup>

---

*Les récentes crises économiques, Covid, géopolitiques..., couplées aux enjeux et objectifs de la lutte contre le changement climatique, ont considérablement renforcé les préoccupations de l'Union européenne et ses pays membres concernant leurs chaînes d'approvisionnement en certains produits et matériaux. Si la première liste de matériaux dits « critiques » de l'Union date de 2011, les préoccupations relatives à l'accès aux ressources sont plus anciennes, comme le rappelle Emmanuel Hache en début de cet article, en particulier aux États-Unis. Néanmoins, le renforcement des alertes concernant les limites planétaires et les besoins spécifiques des secteurs clefs des transitions écologique et numérique confèrent un rôle très stratégique à divers minerais, métaux et matériaux, dont la majeure partie est produite hors d'Europe. Ces matières premières stratégiques indispensables aux transitions en cours pourraient rebattre les cartes sur la scène internationale, et sont au cœur des réflexions de l'Union en matière de souveraineté industrielle et de trajectoire bas-carbone.*

*Emmanuel Hache propose ici un coup de projecteur sur cette « insécurité minérale », au travers d'un état des lieux très clair des conditions d'approvisionnement en ces matières premières stratégiques et de la dépendance de l'Union européenne. Il souligne la « fragmentation du monde » et la manière dont s'organise le commerce entre pays producteurs et consommateurs de ces matériaux critiques : les nouvelles alliances, les risques et atouts qui s'y rapportent, les défis environnementaux et sociaux qui gravitent autour de l'exploitation des minerais stratégiques, et certains impensés (comme la sobriété). Il propose enfin quatre scénarios d'évolution du rapport de l'Union*

---

1. Économiste prospectiviste à l'IFPEN (IFP [ex-Institut français du pétrole] Énergies nouvelles), directeur de recherche à l'IRIS (Institut de relations internationales et stratégiques), coauteur avec Benjamin Louvet de *Métaux, le nouvel or noir. Demain la pénurie ?*, Monaco : éditions du Rocher, 2023 (lauréat du prix Marcel Boiteux 2023 décerné par l'Association des économistes de l'énergie).

*européenne à cette insécurité d'approvisionnement, en fonction d'une part de l'acceptabilité sociale des projets miniers sur son territoire, d'autre part du degré de cartellisation du marché mondial des matières premières. S.D.*

**E**n septembre 2022, Ursula von der Leyen, présidente de la Commission européenne, déclarait lors de son discours sur l'état de l'Union européenne (UE) : « Qu'il soit question de puces électroniques personnalisées pour la réalité virtuelle ou de cellules de stockage pour les installations solaires, l'accès aux matières premières jouera un rôle décisif dans le succès de notre transition vers une économie durable et numérique. Le lithium et les terres rares <sup>2</sup> seront bientôt plus importants encore que le pétrole et le gaz <sup>3</sup>. » À l'insécurité environnementale et énergétique issue, pour la première, de la crise climatique et, pour la deuxième, de la guerre en Ukraine, s'ajouterait ainsi une insécurité minérale à venir, capable de brider les transitions énergétique et numérique européennes.

Les matières premières sont présentes dans l'ensemble des équipements bas-carbone comme le solaire (aluminium, silicium, etc.), l'éolien (cuivre, nickel, etc.), les batteries de véhicules électrifiés (cobalt, cuivre, lithium, nickel, etc.) ou l'hydrogène (nickel, platine, etc.) et elles ont constitué un levier important de leur déploiement. Les trajectoires anticipées par l'Agence internationale de l'énergie (AIE) à l'horizon 2050 <sup>4</sup> — une multiplication par dix de la taille du marché du lithium, par trois de celui du cobalt et par deux de celui du cuivre (tableau 1) — laissent présager une concurrence accrue entre les puissances (Chine, États-Unis, Japon, UE) dans leur volonté de sécuriser leurs besoins.

Stratégiques car fondamentales pour le secteur de la défense et des armées, les matières premières sont aujourd'hui devenues déterminantes pour l'ensemble des secteurs économiques. Les questions relatives aux matériaux ainsi qualifiés de « critiques » ne sont toutefois pas récentes. Elles apparaissent aux États-Unis dès la fin des années 1930, dans un premier décret sur les matériaux stratégiques <sup>5</sup>

---

2. Les terres rares sont le scandium [<sub>21</sub>Sc], l'yttrium [<sub>39</sub>Y] et les 15 lanthanides du tableau périodique des éléments. Elles sont présentes un peu partout dans la croûte terrestre ; le qualificatif « rares » renvoie à leur très faible concentration, qui nécessite l'extraction de grands volumes de matière (NDLR).

3. Discours sur l'état de l'Union 2022 de la présidente von der Leyen, 14 septembre 2022. URL : [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/SPEECH\\_22\\_5493](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/SPEECH_22_5493). Consulté le 21 novembre 2023.

4. « Critical Minerals Data Explorer », AIE, juillet 2023. URL : <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/critical-minerals-data-explorer>. Consulté le 21 novembre 2023.

5. *Strategic and Critical Materials Stock Piling Act* de 1939.

Tableau 1. Métaux de la transition bas-carbone : marchés et besoins

	Production mondiale 2022 (en kt)	Réserves mondiales 2022 (en kt)	Ratio R/P* (en années)	Besoins 2050 Scénario NZE** (en kt)	Part des technologies bas-carbone dans les besoins en 2050
Cobalt	190	8 300	43	519	56 %
Cuivre	22 000	890 000	40	40 000	45 %
Lithium	130	26 000	200	1 313	90 %
Nickel	3 300	100 000	30	6 195	60 %
Terres rares	300	130 000	433	–	–

Kt = kilotonnes.

\*Le ratio de réserves sur production (R/P) permet d'estimer, au vu des réserves existantes et de la production actuelle, le temps de consommation théoriquement restant pour une ressource.

\*\*Le scénario NZE (*Net Zero Emission*) est une trajectoire du secteur mondial de l'énergie compatible avec des émissions nettes de CO<sub>2</sub> nulles d'ici à 2050, qui permet également d'atteindre les principaux objectifs de développement durable (ODD) et de limiter l'augmentation de la température mondiale à 1,5 °C.

Sources : AIE, USGS (United States Geological Survey).

en vue notamment d'un conflit en Europe et en Asie. Elles sont toutefois renouvelées par un triple contexte : une dynamique de décarbonation mondiale, une rivalité systémique entre puissances et une conscience des limites planétaires.

## Du rapport Paley à l'invisibilisation des matières premières dans la pensée prospective

### *Des ressources pour la liberté aux ressources pour la croissance*

Si les ouvrages de Fairfield Osborn <sup>6</sup> et de William Vogt <sup>7</sup> ont popularisé les craintes de surpopulation mondiale <sup>8</sup>, de dégradations environnementales et d'épuisement des ressources naturelles dès 1948, ils s'accompagnent d'une nouvelle réflexion sur le caractère stratégique des matières premières, issue notamment du rapport *America's Needs and Resources* <sup>9</sup>. La résurgence de ces thématiques aux États-Unis ne faisait pourtant que refléter le nouveau statut d'importateur de matières premières de l'économie américaine sur

6. OSBORN Fairfield, *Our Plundered Planet*, Boston : Little, Brown and Company, 1948 (traduction française, *La Planète au pillage*, Paris : Payot, 1949).

7. VOGT William, *Road to Survival*, New York : William Sloane Associates, 1948 (traduction française, *La Faim du monde*, Paris : Hachette, 1950).

8. Voir également, deux décennies plus tard : EHRLICH Paul R., *The Population Bomb*, New York : Ballantine Books, 1968 (traduction française, *La Bombe P*, Paris : Fayard, 1970).

9. DEWHURST J. Frederic and Associates, *America's Needs and Resources*, New York : The Twentieth Century Fund, 1947. URL : <https://archivesofthecentury.org/myportfolio/americas-needs-and-resources/>. Consulté le 21 novembre 2023.

les marchés mondiaux et ses potentielles vulnérabilités. Le titre du premier rapport de la commission Paley (1952), « Ressources pour la liberté <sup>10</sup> », mise en place en 1951 sous la présidence Truman, est particulièrement évocateur du caractère civilisationnel des menaces liées aux matériaux qui pourraient « saper notre niveau de vie croissant, nuire à la qualité dynamique du capitalisme américain et affaiblir les fondements économiques de la sécurité nationale ». Ses conclusions proposent d'aborder la question des approvisionnements dans une logique du moindre coût, en recourant notamment aux investissements à l'étranger et en abrogeant certaines lois relatives à la préférence de production nationale (*Buy American*), tout en subventionnant en partie certains secteurs.

Souvent perçu comme un tournant des réflexions stratégiques aux États-Unis, le rapport Paley est aussi un vecteur de la grande accélération de la consommation observée dans les décennies qui suivent <sup>11</sup>. En effet, il invite à dépasser les limites physiques et une vision géologique des ressources pour une approche plus économique de la rareté. La hausse des prix et des coûts permet l'exploration de nouvelles ressources, notamment à l'étranger, incite à la substitution et stimule la recherche-développement (R&D) sur l'ensemble de la chaîne de valeur. Le rapport rompt ainsi avec le pessimisme de l'épuisement des ressources et contribue à appuyer une nouvelle forme d'orthodoxie, une invisibilisation des limites physiques des ressources naturelles dans l'économie, que l'on retrouvera chez les économistes de la croissance comme Robert Solow <sup>12</sup> ou, au début des années 1980, chez Julian Simon dans son ouvrage *The Ultimate Resource [La Ressource ultime]* <sup>13</sup>. Selon ce dernier, la capacité d'invention et d'adaptation de l'homme est inaltérable et empêche ainsi de penser une quelconque problématique d'épuisement <sup>14</sup>.

---

10. PALEY COMMISSION, *Resources for Freedom*, rapport de la President's Materials Policy Commission, université du Michigan, 1952. URL : <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015028172412&view=1up&seq=6>. Consulté le 21 novembre 2023.

11. STEFFEN Will, CRUTZEN Paul J. et MCNEILL John R., « The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature? », *Ambio*, vol. 36, n° 8, décembre 2007, p. 614-621.

12. SOLOW Robert, « A Contribution to the Theory of Economic Growth », *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 70, n° 1, février 1956, p. 65-94.

13. SIMON Julian L., *The Ultimate Resource*, Princeton : Princeton University Press, 1981.

14. En 1980, Paul Ehrlich et Julian Simon feront un pari sur le niveau des prix des matières premières à la fin de la décennie 1990. Le premier prévoyait des prix plus élevés à la fin de la décennie en raison des questions de dépletion et de croissance démographique, quand le second prédisait une diminution. Paul Ehrlich perdit son pari, les prix des matières premières enregistrant une baisse sensible au cours de la décennie 1980.

## **Le Club de Rome : acte I des limites planétaires**

Si les Trente Glorieuses et l'optimisme issu de la période de reconstruction contribuent à la diffusion du modèle consumériste, les questions relatives à l'épuisement des ressources naturelles se retrouvent au cœur des débats à la fin des années 1960. En 1968, sous l'impulsion d'Aurelio Peccei<sup>15</sup> et d'Alexander King<sup>16</sup>, une trentaine de scientifiques, économistes et industriels organisent une rencontre à Rome pour discuter des conséquences environnementales du modèle de développement observé depuis 1945. La poursuite des discussions s'organisa autour de la création du Club de Rome<sup>17</sup> et de leur rencontre avec Jay Forrester, père de la dynamique des systèmes, en 1970. Il permit d'envisager le développement d'une approche modélisée des dynamiques économiques et environnementales mondiales qui se poursuivra avec Dennis et Donella Meadows et l'équipe du Massachusetts Institute of Technology (MIT). Le rapport *The Limits to Growth*, publié en mars 1972<sup>18</sup>, expose des trajectoires mondiales d'insoutenabilité du modèle de développement malgré des hypothèses très hétérodoxes (ressources illimitées, contrôle de la population et des naissances, etc.).

Controversé pour certains en raison de la simplification des hypothèses ou de l'absence de fondements économiques, critiqué par d'autres en raison de son catastrophisme ou de son parti pris décroissant, le rapport constitue l'effort pionnier en matière de modélisation prospective environnementale. Pourtant déconnecté de ces derniers, il trouvera une autre résonance avec les événements observés durant la décennie 1970 (tensions sur les marchés agricoles entre 1972 et 1974) et avec le premier choc pétrolier de 1973-1974. Ces derniers vont progressivement amener les acteurs à reconsidérer des interrogations plus larges, comme la sécurité d'approvisionnement. Véritable rupture sur le premier marché énergétique mondial, le premier choc pétrolier de 1973 conduit ensuite à penser les marchés de matières premières et les prix dans leur dimension de volatilité.

---

15. Industriel membre du conseil d'administration de Fiat.

16. Scientifique et ancien directeur de la section Éducation et science de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE).

17. Plus d'informations sur le site Internet du Club de Rome : <http://www.clubofrome.org/about-us/history/>

18. MEADOWS Donella *et alii*, *The Limits to Growth*, New York : Universe Books, 1972 (traduction française : *Halte à la croissance ?*, Paris : Fayard, 1972).

## **La fin d'une logique de minimisation des coûts ou le retour de la sécurisation des besoins**

Durant les années 1980 et 1990, les marchés de matières premières vont être marqués par deux tendances majeures. D'une part, dans un contexte généralisé de déréglementation, le big bang financier des années 1980 aux États-Unis et au Royaume-Uni révolutionne le fonctionnement des marchés. Les Bourses de matières premières vont importer tous les outils de la finance moderne (options, produits dérivés, etc.) pour permettre aux acteurs de gérer la nouvelle instabilité des prix. D'autre part, les marchés de matières premières vont connaître, en moyenne, un déclin marqué de leurs prix après le second choc pétrolier durant plus de deux décennies. L'invisibilité des matières premières dans le champ de l'économie trouve également sa source dans le nouveau paradigme géopolitique mondial issu de l'effondrement de l'URSS et synthétisé par Francis Fukuyama dans « La fin de l'Histoire <sup>19</sup> ? »

Durant les années 1990, épisode heureux de la mondialisation couplé d'un ordre mondial unipolaire reflet de l'hyperpuissance américaine, la question de la sécurisation des approvisionnements devient une question économique de minimisation des coûts d'achat des matières premières. Le retour d'une forme de nationalisme pétrolier et gazier au début des années 2000 marquera le retour du concept de matières premières comme arme diplomatique. Toutefois, ce n'est réellement que la crise des terres rares observée en 2009-2011 qui constituera un véritable tournant et qui a replacé sur le devant de la scène internationale la problématique d'approvisionnement en métaux. Elle donnera naissance en France à la création du Comité des métaux stratégiques (COMES) en 2012 et provoquera un renforcement des politiques dédiées à ces questions aux États-Unis et au Japon.

Les premières matrices de criticité sont établies à partir de cette période. La Commission européenne élabore sa première liste de matériaux critiques en 2011 et la renouvelle tous les trois ans. Initialement composée de 14 éléments, elle en comprend désormais plus de 34 <sup>20</sup> en 2023 (tableau 4, *infra*), contre 50 aux États-Unis et 32 au Japon. Une étude des métaux critiques communs entre ces trois espaces géographiques montre qu'aucun ne peut être auto-

---

19. FUKUYAMA Francis, « The End of History? », *The National Interest*, n° 16, été 1989, p. 3-18. Voir aussi l'ouvrage qui a suivi : *The End of History and the Last Man*, New York : Free Press, 1992 (traduction française, *La Fin de l'Histoire et le dernier homme*, Paris : Flammarion, 1992).

20. En réalité 51 métaux si on décompose le segment des terres rares et des platinoides.

## LE COMES ET L'OFREMI

Le Comité des métaux stratégiques (COMES) est chargé, en France, de gérer la sécurité d'approvisionnement en métaux stratégiques afin de soutenir la compétitivité de l'économie. Avec l'expertise du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), il élabore notamment les fiches de criticité<sup>1</sup> des métaux pour l'économie française, organise des séminaires et publie des notes (prix des métaux, recyclage, filières, etc.).

En novembre 2022 a été lancé l'Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles (OFREMI) qui regroupe les experts des instituts spécialisés sur ces questions : BRGM, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA),

IFPEN, Agence de la transition écologique (ADEME), Institut français des relations internationales (IFRI), Conservatoire national des arts et métiers (CNAM). Il a pour objectif de renforcer la résilience et la souveraineté des filières industrielles en sécurisant les approvisionnements en ressources minérales. Sa création avait été identifiée comme prioritaire après la publication du rapport Varin sur « la sécurisation de l'approvisionnement en matières premières minérales » en janvier 2022<sup>2</sup>, au même titre que la nomination d'un délégué interministériel et la constitution d'un fonds d'investissement dans les métaux stratégiques. ■

E.H.

1. Voir « Substances critiques et stratégiques », *Mineral Info*. URL : <https://www.mineralinfo.fr/fr/securete-des-approvisionnement-pour-leconomie/substances-critiques-strategiques>. Consulté le 21 novembre 2023.

2. Présenté sur le site du ministère de la Transition écologique. URL : <https://www.ecologie.gouv.fr/investir-dans-france-2030-remise-au-gouvernement-du-rapport-varin-sur-securisation>. Consulté le 21 novembre 2023.

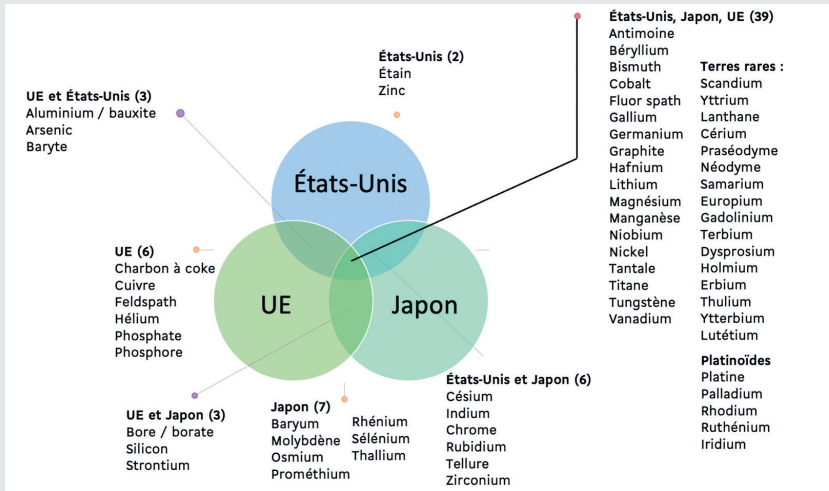
nome et que tous seront en concurrence dans leur stratégie de sécurisation. Chaque pays se concentre sur la recherche de maîtrise ou d'autonomie stratégique, plutôt que sur une volonté de s'isoler et de se fermer aux marchés internationaux.

## La fragmentation du monde : restrictions, coopération et cartel

### *Les matières premières : causes ou conséquences de la « géofragmentation » du monde ?*

En 2021, portés par la dynamique économique post-Covid et par la désorganisation des chaînes d'approvisionnement mondiales, les marchés de matières premières ont enregistré une hausse marquée de leurs prix. Et la guerre en Ukraine débutée en février 2022 a per-

## Graphique 1. Liste des matériaux critiques aux États-Unis, au Japon et dans l'UE



Sources : Commission européenne, département américain de l'Énergie, Japan Organization for Metals and Energy Security (JOGMEC).

cuté des marchés déjà extrêmement tendus. En effet, la Russie est un producteur majeur de métaux (aluminium, cobalt, cuivre, nickel, palladium, platine, titane) et le conflit a fait ressurgir des craintes de pénurie dans de nombreux secteurs (automobile, aéronautique, semi-conducteurs). Surtout, le contexte observé depuis 2019 (crise sanitaire, économique et géopolitique) a mis à mal la résilience des chaînes de valeur industrielles et mis en évidence une accélération de la fragmentation du monde. Baptisée « géofragmentation » dans le rapport 2023 du Fonds monétaire international (FMI) <sup>21</sup>, cette dynamique est apparue suite au Brexit et aux tensions commerciales entre les États-Unis et la Chine, et s'accroît depuis la guerre d'Ukraine <sup>22</sup>. Ce mouvement trouve son corollaire géopolitique dans le concept de désoccidentalisation. Il interroge à la fois les questions commerciales (plateau de mondialisation ou démondialisation), mais également la dynamique de (re)construction de blocs de puissance (monde occidental versus monde chinois ou pays émergents).

21. Voir *Perspectives de l'économie mondiale*, Washington, D.C. : FMI, octobre 2023. URL : <https://www.imf.org/fr/Publications/WEO/Issues/2023/10/10/world-economic-outlook-october-2023>. Consulté le 22 novembre 2023.

22. AIYAR Shekhar et alii, *Geoeconomic Fragmentation and the Future of Multilateralism*, Washington, D.C. : FMI, *Staff Discussion Note* n° 2023/001, janvier 2023. URL : <https://www.imf.org/-/media/Files/Publications/SDN/2023/English/SDNEA2023001.ashx>. Consulté le 22 novembre 2023.

**Tableau 2. Restrictions sur les marchés de matières premières imposées par la Chine**

Taxes à l'exportation	Permis d'exportation
Aluminium, antimoine, cuivre, ferro-chrome, ferro-manganèse, ferro-silicium, fer (fonte brute), plomb, nickel, phosphates, étain, tungstène, déchets et débris métalliques, zinc	Bauxite, béryllium, bismuth, chrome, cobalt, coke, charbon à coke, fluor spath, gallium, germanium, graphite, magnésite, manganèse, molybdène, terres rares, argent, silicium, talc, tantale, titane, vanadium, zirconium

Source : OCDE.

Une récente étude de l'OCDE <sup>23</sup> sur le commerce international de matériaux critiques offre une image intéressante des dynamiques en cours. Les pays de l'OCDE sont dépendants des pays non membres (Chine, Russie, Brésil, Afrique du Sud et Inde) pour leurs approvisionnements, et l'utilisation des restrictions à l'exportation est motivée par un ensemble complexe de considérations économiques et non économiques. Les restrictions sur les minerais (amont de la chaîne de valeur) ont augmenté plus rapidement que celles sur les autres segments industriels. La Chine, l'Inde, l'Argentine, la Russie, le Viêt-nam et le Kazakhstan comptabilisent le nombre de nouvelles restrictions le plus important sur la période 2009-2020. En d'autres termes, les pays de l'OCDE sont de plus en plus exposés aux restrictions de la part de leurs principaux fournisseurs, et cette situation pourrait jouer un rôle non négligeable dans la disponibilité des matières premières ou sur le niveau et la volatilité de leurs prix.

Leur généralisation pose la question d'un possible mouvement de cartellisation des marchés dans les années à venir. À l'instar de Robert Pindyck, nous pourrions écrire que « la cartellisation des marchés mondiaux n'est pas un phénomène nouveau <sup>24</sup> ». Mais la création d'une Organisation des pays exportateurs de métaux (OPEM) permettrait de coaliser les intérêts de pays comme la Russie, le Chili, le Pérou, la république démocratique du Congo, la Chine et l'Afrique du Sud. Facteur de stabilisation des marchés pour certains ou de manipulation des prix pour d'autres, la mise

23. KOWALSKI Przemyslaw et LEGENDRE Clarisse, *Raw Materials Critical for the Green Transition: Production, International Trade and Export Restrictions*, Paris : OCDE, Trade Policy Paper n° 269, avril 2023. URL : <https://www.oecd.org/publications/raw-materials-critical-for-the-green-transition-c6bb598b-en.htm>. Consulté le 22 novembre 2023.

24. PINDYCK Robert S., « The Cartelization of World Commodity Markets », *The American Economic Review / Papers and Proceedings of the Ninety-First Annual Meeting of the American Economic Association* (mai 1979), vol. 69, n° 2, 1979, p. 154-158.

## VERS UNE ORGANISATION DES PAYS EXPORTATEURS DE MÉTAUX ?

L'idée d'une OPEM (Organisation des pays exportateurs de métaux) a ressurgi fin 2022 avec la déclaration du ministre indonésien de l'Investissement sur la possible création d'un cartel des pays producteurs des métaux des batteries. Une telle évocation n'est pas nouvelle puisque après la création de l'OPEP (Organisation des pays exportateurs de pétrole) en 1960, des organisations aujourd'hui disparues avaient vu le jour. Ce fut le cas en 1967, sur le marché du cuivre, avec le CIPEC (Conseil intergouvernemental des pays exportateurs de cuivre), ou en 1974, sur celui de la bauxite, avec l'IBA

(International Bauxite Association). L'interrogation indonésienne rappelle certains discours autour d'un cartel du lithium entre l'Argentine, la Bolivie et le Chili. Si de nombreux obstacles peuvent entraver la création de telles organisations — poids des acteurs OCDE (Australie, Canada) sur les marchés, poids des entreprises étrangères dans la production, poids de la Chine —, leur émergence dans les discussions internationales reflète une affirmation des pays producteurs et la place croissante qui est la leur dans la transition énergétique mondiale. ■

E.H.

en place de quotas de production ou d'exportation pourrait favoriser une hausse des prix des métaux, un renchérissement des prix des équipements bas-carbone et de la transition. Ce mouvement retarderait la dynamique de décarbonation et creuserait les inégalités géographiques dans l'adoption des technologies. Utilisant son pouvoir de marché comme une arme diplomatique et économique, le cartel pourrait être le vecteur d'alliances plus importantes et plus fortes au niveau international, alliances ponctuelles dictées par la conjoncture internationale, ou plus structurelles. Il constituerait ainsi une sorte de pendant au concept de partenariat amical (*friend-shoring*<sup>25</sup>) privilégié aujourd'hui par les puissances occidentales. Si le récent élargissement des BRICS (Brésil, Russie, Inde, Chine, Afrique du Sud) à six nouveaux membres n'inclut pas de producteurs majeurs de métaux mais surtout des producteurs d'hydrocarbures<sup>26</sup>, il doit être regardé avec attention. Une future ouverture vers les pays producteurs de métaux serait le signe de la création d'une alternative de gouvernance internationale fondée

25. Le *friend-shoring* est un concept qui a pour objectif de recréer des chaînes de valeur industrielles localisées chez des pays considérés comme amis et partageant des valeurs communes.

26. En octobre 2023, le groupe des BRICS a décidé d'accueillir l'Arabie Saoudite, l'Argentine, l'Égypte, les Émirats arabes unis, l'Éthiopie et l'Iran dans ses rangs. Ensemble ils représentent environ 30 % du produit intérieur brut mondial.

en partie sur les matières premières. Et ce nouveau club pourrait à terme intégrer des considérations monétaires — avec le yuan comme monnaie de référence — ou réglementaires chinoises.

### **Les réponses des pays consommateurs et la question de l'autonomie stratégique**

Dans ce contexte, recouvrer une souveraineté technologique et industrielle nécessite de la part des acteurs des politiques ambitieuses. Dans le règlement européen (CRMA / *Critical Raw Materials Act*) publié en mars 2023, l'UE a défini des objectifs ambitieux à l'horizon 2030<sup>27</sup>. Son secteur extractif doit ainsi répondre à 10 % de la demande intérieure, son secteur métallurgique à 40 % de sa consommation et le recyclage à au moins 15 %. Enfin, le CRMA envisage que l'UE ne puisse être dépendante à plus de 65 % d'un seul pays extérieur à la zone et il ambitionne de combler le retard européen par rapport aux États-Unis ou au Japon sur ces questions.

En effet, les métaux critiques ont été qualifiés de vulnérabilité stratégique et de menace extraordinaire par l'administration Trump, et ont fait l'objet d'une impulsion majeure aux États-Unis dès 2017. L'administration Biden a amplifié cette politique avec la mise en place d'un plan structurel ambitieux pour les acteurs des secteurs minier et métallurgique : réforme d'un code minier déjà très attractif, soutien financier à la production nationale, à la filière recyclage et à la constitution de stocks stratégiques. En parallèle, la mise en place de l'*Inflation Reduction Act* (IRA) en novembre 2022 a consolidé les incitations à la relocalisation des activités minières et métallurgiques sur le sol américain, même s'il peut aussi paradoxalement amplifier les besoins américains en métaux critiques<sup>28</sup>. Fort de ses entreprises internationales dans le secteur, comparativement à l'UE, Washington mise également sur les relations bilatérales déjà existantes avec les grands pays miniers de l'OCDE (Canada et Australie), mais aussi sur des alliances plus larges géographiquement et thématiquement. De fait, Washington cherche un double dividende avec le développement de ces alliances. Le Cadre économique indo-pacifique pour la prospérité signé en 2022 avec 12 pays asiatiques touche ainsi aux

---

27. Voir *Study on the Critical Raw Materials for the EU*, Bruxelles : Commission européenne (Direction générale du marché intérieur, de l'industrie, de l'entrepreneuriat et des PME), mars 2023. URL : [https://single-market-economy.ec.europa.eu/document/download/04f72016-032f-4dc1-92cd-1ada791b5540\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/document/download/04f72016-032f-4dc1-92cd-1ada791b5540_en). Consulté le 22 novembre 2023.

28. « The IRA and the US's Mineral Supply Challenge », *blog S&P Global / Market Intelligence*, 15 août 2023. URL : <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/mi/research-analysis/us-ira-and-critical-mineral-supply-challenge.html>. Consulté le 22 novembre 2023.

Tableau 3. Initiatives sur les métaux

Initiatives	Pays concernés	Types d'accord
Alliance européenne des batteries (2017)	UE	Créer une chaîne de valeur compétitive en Europe sur la production de cellules de batteries
Initiative de cartographie des minéraux critiques (2019)	Australie, Canada, États-Unis	Collaboration de recherche
Energy Resource Governance Initiative (2019)	Australie, Botswana, Canada, États-Unis, Pérou	Améliorer les pratiques de développement minier
Alliances européennes des matières premières (2020)	UE	Sécuriser l'accès aux matières premières durables et au savoir-faire en matière de transformation
Initiative sur les chaînes de valeur résilientes (2021)	Australie, Inde, Japon	Promouvoir les investissements et réduire la dépendance à la Chine
Partenariat pour la sécurité des ressources minérales (2022)	Allemagne, Australie, Canada, Corée, États-Unis, Finlande, France, Japon, Royaume-Uni, Suède et UE	Valoriser la production, le traitement et le recyclage
Cadre économique indo-pacifique pour la prospérité (2022)	Australie, Brunei Darussalam, Corée du Sud, États-Unis, Inde, Indonésie, Japon, Malaisie, Nouvelle-Zélande, Philippines, Singapour, Thaïlande et Viêt-nam	Décarbonation et infrastructures ; fiscalité et lutte contre la corruption ; résilience des chaînes d'approvisionnement

Source : HACHE Emmanuel, HERBEMONT Vincent (d') et MALBEC Louis-Marie, « Criticité et géopolitique des matières premières requises par les technologies bas-carbone », *Annales des mines, série Responsabilité et environnement*, n° 111, juillet 2023. URL : <https://www.annales.org/re/2023/re111/2023-07-12.pdf>. Consulté le 22 novembre 2023.

questions de corruption, de fiscalité, mais également au développement d'infrastructures. Elle pourrait apparaître comme la base d'un projet alternatif à celui de la Chine des nouvelles routes de la soie <sup>29</sup>.

Le Japon a, de son côté, construit une architecture organisationnelle performante autour de la Japan Organization for Metals and Energy Security (JOGMEC) <sup>30</sup>. L'UE, dépendante à plus de 95 % pour les matériaux essentiels aux transitions bas-carbone et numérique, ne possède ni la structure organisationnelle japonaise, ni les champions métallurgiques étatsuniens, ni un code minier attractif. Elle est bien moins dotée en ressources naturelles que les États-Unis et

29. CARCANAGUE Samuel et HACHE Emmanuel, « Les infrastructures de transport, reflet d'un monde en transition », *La Revue internationale et stratégique*, n° 107, automne 2017.

30. Elle est issue de la fusion en 2004 de la Japan National Oil Corporation (JNOC) et la Metal Mining Agency of Japan (MMAJ). Voir « JOGMEC Carbon Neutral Initiative: Basic Policy and Action Plan ». URL : [https://www.jogmec.go.jp/english/about/about\\_jogmec\\_01\\_000003.html](https://www.jogmec.go.jp/english/about/about_jogmec_01_000003.html). Consulté le 22 novembre 2023.

## Carte 1. Ressources géologiques en France métropolitaine



Au : or ; Cu : cuivre ; F : fluorine ;  
He : hélium ; Li : lithium ;  
Mo : molybdène ; Nb : niobium ;  
Pb : plomb ; Sb : antimoine ;  
Sn : étain ; Ta : tantale ;  
W : Tungstène ; Zn : zinc.

N.B. : il existe une production importante de nickel en Nouvelle-Calédonie.

Source : « Le potentiel du sous-sol français », *Mineral Info*. URL : <https://www.mineralinfo.fr/fr/ressources-minerales-france-gestion/potentiel-du-sous-sol-francais#un-potentiel-en-mtaux-en-roches-et-minraux-industriels>. Consulté le 22 novembre 2023.

son objectif de production n'apparaît pas réaliste pour l'ensemble des métaux car l'UE ne dispose pas de réserves géologiques suffisantes. Des ressources existent certes en Suède (terres rares), du lithium est présent dans de nombreux pays (France, Portugal, Allemagne), comme du nickel (Finlande, France [Nouvelle-Calédonie]) et du cuivre (Espagne, Finlande, Suède, etc.), mais concernant de nombreux autres (borate, antimoine, tantale, manganèse, graphite, etc.), l'objectif sera difficile à atteindre.

En outre, l'horizon 2030 paraît bien proche pour les développements miniers qui, dans le meilleur des cas <sup>31</sup>, nécessitent de 8 à 15 ans (selon les métaux) entre les phases d'exploration et de production. Des estimations plus approfondies vont être menées en France, notamment pour permettre une mise à jour du potentiel géologique. Enfin, les questions relatives au financement des activités minières européennes et à leur intégration dans la taxonomie européenne sur les activités bas-carbone nécessitent d'être prises en compte, tout comme la mise en place d'un cadre innovant permettant d'intégrer et de dépasser les questions d'acceptabilité.

L'objectif centré sur les activités métallurgiques paraît élevé pour un espace marqué par la désindustrialisation depuis les années 2000. Contrairement au secteur extractif, les contraintes du secteur

31. Les questions relatives à l'acceptation sociale seront traitées dans la dernière partie de cet article.

**Tableau 4. Liste des matériaux critiques et stratégiques selon l'UE**

Aluminium-Bauxite	Antimoine	Arsenic	Baryte	Béryllium	Bismuth	Borate	Cobalt
Charbon à coke	Feldspath	Gallium	Germanium	Hafnium	Hélium	Terres rares légères	Lithium
Terres rares lourdes	Magnésium	Manganèse	Graphite naturel	Niobium	Platinoïdes	Roches phosphatées	Phosphore
Scandium	Silicium métal	Fluor spath	Strontium	Tantale	Titane métal	Tungstène	Vanadium
Cuivre	Nickel						

Source : Commission européenne, 2023.

de la transformation relèvent plus de considérations économiques et sociales. À l'heure actuelle, ce segment est majoritairement contrôlé par la Chine<sup>32</sup>. Pékin raffine par exemple autour de 65 % des principaux métaux des batteries (cobalt, lithium, manganèse). Atteindre l'objectif européen nécessitera des capitaux, des compétences sur le territoire, un niveau des prix de l'énergie compétitif, une réelle volonté politique pour relocaliser des activités polluantes et la mise en place de normes environnementales et sociales drastiques sur l'ensemble de la chaîne de valeur. Un changement de logique devrait intervenir concernant le recyclage puisque l'objectif discuté ne devrait plus faire référence à la consommation annuelle de l'UE mais aux métaux critiques contenus dans les déchets. Il imposera ainsi à l'espace européen de gérer ses flux de déchets. Les politiques de recyclage pourraient constituer un levier de sécurisation des besoins, mais elles resteraient limitées sans une politique plus globale de réduction de la consommation de biens matériels et sans une réglementation imposant une part importante de matières premières recyclées dans les équipements<sup>33</sup>.

## Les dimensions environnementales

### *Les conflits futurs dans les pays du Sud*

La hausse anticipée de la demande en métaux risque de porter une pression supplémentaire pour les pays miniers existants et devrait

32. BONNET Tanguy et alii, « Métaux stratégiques : la clairvoyance chinoise », *La Lettre du CEPPII (Centre d'études prospectives et d'informations internationales)*, n° 428, juin 2022. URL : <http://www.cepii.fr/CEPII/fr/publications/lettre/abstract.asp?NoDoc=13403>. Consulté le 22 novembre 2023.

33. GROSSE François, « Le défi de l'économie circulaire. Pour une nouvelle approche », *Futuribles*, n° 455, juillet-août 2023, p. 33-48.

également élargir le champ potentiel de producteurs. Ces derniers constituent ainsi, dans la dynamique de transition, une nouvelle frontière de production. Ce mouvement a deux conséquences. La première est un renchérissement du coût de production des métaux avec la mise en production de gisements moins concentrés, moins accessibles et nécessitant donc de plus amples besoins en énergie<sup>34</sup> et en eau dans des régions plus risquées géopolitiquement. La seconde est une multiplication potentielle des conflits locaux car, comme l'affirme le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) : « Au cours des 60 dernières années, au moins 40 % des conflits intraétatiques ont un lien avec les ressources naturelles et ce lien double le risque de reprise des conflits [dans les] cinq [...] années [suivant leur arrêt]<sup>35</sup>. » Si le changement climatique n'est pas aujourd'hui une source directe de conflit, il est considéré comme un accélérateur de menaces et comme exacerbant les vulnérabilités existant dans les territoires.

Dans son ouvrage *Extractivisme*<sup>36</sup>, Anna Bednik dénonce les impacts sur les ressources en eau de l'exploitation du lithium dans les salars (déserts de sel) sud-américains et ses conséquences pour les populations. L'extraction minière est à l'origine d'une hausse des prélèvements dans les nappes phréatiques, provoque un assèchement des rivières, leur pollution et *in fine* la réduction ou la migration des populations animales et humaines. Les perspectives de réchauffement climatique dans les régions minières (Australie, Chili, Chine, etc.) ne sont pas faites pour rassurer puisqu'une grande part des productions minérales est située dans des régions menacées par le *stress* hydrique.

La multiplication des conflits entre les entreprises et les populations est une tendance lourde du secteur minier depuis la fin des années 1990. L'Atlas mondial de la justice environnementale<sup>37</sup> recense ainsi près de 60 conflits au Chili, dont près de 75 % sont liés aux problématiques minières, 70 en Argentine et plus de 40 en

---

34. Le secteur de la production de métaux représente environ 10 % de la consommation mondiale d'énergie et 10 % des émissions de CO<sub>2</sub>.

35. Page « Conflits et ressources naturelles », Nations unies. URL : <https://peacekeeping.un.org/fr/conflict-and-natural-resources>. Consulté le 22 novembre 2023.

36. BEDNIK Anna, *Extractivisme. Exploitation industrielle de la nature : logiques, conséquences, résistances*, Lorient : Le Passager clandestin, 2016.

37. Financé à son origine par l'UE à travers le projet EJOLT (*Environmental Justice Organizations, Liabilities and Trade*), cet outil recense les conflits liés aux atteintes à l'environnement (combustibles fossiles, extraction minière, déchets, eau, etc.). L'outil de cartographie interactive permet de mettre en évidence par pays et par sujet les principales zones de conflit. Il en recense plus de 3 880 aujourd'hui. Voir *Global Atlas of Environmental Justice*. URL : <https://ejatlas.org/>. Consulté le 22 novembre 2023.

Bolivie. Les continents les plus touchés restent l'Amérique latine (Chili, Mexique, Pérou), l'Afrique (Afrique du Sud, république démocratique du Congo, Tanzanie, Zambie, etc.) et l'Asie (Inde et Chine). La résistance des populations locales s'organise pour faire reconnaître un statut spécifique à leurs territoires, et celles-ci mettent en exergue les conséquences sur l'organisation des communautés et des croyances. Elles soulignent le manque de transparence de l'industrie et la minimisation des pollutions engendrées par leurs activités. Différents moyens d'action sont mobilisés dans les luttes (actions symboliques, blocage de routes et de sites industriels, manifestations violentes, actes criminels) pour espérer une résonance nationale voire internationale et un arbitrage de l'État, souvent accusé d'être plus soucieux des intérêts économiques des compagnies que des droits des populations locales. Les conflits environnementaux actuels et potentiels dans les pays du Sud constituent un angle mort de la transition bas-carbone.

### ***Les futurs « gilets jaunes » de la contestation minière***

Penser que seuls les pays du Sud seront confrontés aux impacts environnementaux de la production métallurgique et minière serait occulter les possibles développements envisagés dans les pays du Nord. La dimension géographique et sociale de l'insécurité minérale doit être sérieusement envisagée dans les décennies à venir. En effet, la question de l'acceptabilité va devenir centrale.

La France est un exemple marquant de recul de la culture industrielle et, pour la majeure partie de la population, l'image qui prévaut aujourd'hui du secteur minier est celle du XIX<sup>e</sup> siècle et de *Germinal*<sup>38</sup>, des conditions de travail difficiles et des luttes syndicales<sup>39</sup>. Les seuls points positifs attachés à la mine — la solidarité et la vie en communauté — semblent passer au second plan dans une France de plus en plus « archipélisée<sup>40</sup> ». Un défi gouvernemental majeur reste ainsi la transformation structurelle des représentations de la mine.

Un autre défi consistera à coconstruire et à renoncer si besoin. Un rapport datant de 2018 montre par exemple qu'il existerait en France plus de 40 sites potentiels de développement de lithium, qui pourraient permettre au pays de sécuriser une partie de ses

---

38. Roman d'Émile Zola paru en 1885 (réédité régulièrement, notamment par Gallimard [Paris]).

39. HACHE Emmanuel et LOUVET Benjamin, *Métaux, le nouvel or noir*, op. cit.

40. FOURQUET Jérôme, *L'Archipel français. Naissance d'une nation multiple et divisée*, Paris : Seuil, 2019.

besoins <sup>41</sup>. Les plus économiquement intéressants restent le site de Beauvoir dans l'Allier, celui de Tréguennec dans le Finistère et trois sites dans le Bas-Rhin. Sur le premier, l'entreprise Imerys ambitionne de développer un gisement de lithium sur un site exploité depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle pour la production d'argile. Dans le Bas-Rhin, des permis ont été déposés pour l'exploitation du lithium des eaux géothermales. Dans les deux cas, des sites et des infrastructures industriels préexistent et pourtant, les riverains s'inquiètent des conséquences de l'exploitation en matière de consommation d'eau et de pollutions. Malgré cela, les développements paraissent réalisables si les industriels démontrent leur capacité à réduire les impacts environnementaux et sociaux de leurs activités. Tréguennec devrait être quant à lui l'exemple du renoncement tant les conséquences sur l'environnement seraient potentiellement désastreuses sur ce lieu classé Natura 2000 et Ramsar <sup>42</sup>, qui recèle un caractère exceptionnel en matière de biodiversité.

L'absence d'un récit national sur la transition bas-carbone ne permet pas de mobiliser la population sur le seul objet de la souveraineté économique ou sur celui de la résilience des chaînes de valeur industrielles. Il est donc fondamental de renoncer dans certains cas, et de trouver des mécanismes incitatifs innovants au niveau local pour améliorer l'acceptabilité dans d'autres. Un renforcement des politiques pour lier l'acceptation du développement minier sur un territoire et des incitations fiscales spécifiques et territorialisées est nécessaire.

La question minière expose également l'espace européen à une réelle problématique sociale. La nouvelle aventure minière ne doit pas accentuer les fractures entre des territoires miniers soumis aux impacts environnementaux, qui alimenteraient en lithium et autres métaux des utilisateurs de véhicules électriques localisés pour la plupart dans les grandes métropoles. La crainte d'une France (Europe) coupée en deux sur ces questions est bien réelle. Si le retour à une production minière nationale plus écologique permettrait à la France et à l'Europe de prendre leur part dans la transition bas-carbone et de regarder la transition en face, il n'est pas moins vecteur de fracture sociale.

---

41. GLOAGUEN Éric et alii, *Ressources métropolitaines en lithium et analyse du potentiel par méthodes de prédictivité*, rapport du BRGM, 2018. URL : <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-68321-FR.pdf>. Consulté le 22 novembre 2023.

42. Les sites classés Natura 2000 sont désignés pour protéger les habitats et les espèces représentatifs de la biodiversité européenne. La convention de Ramsar est un traité de protection de l'environnement signé en 1971. Voir les pages dédiées, URL : <https://www.natura2000.fr/> et <https://ramsar.org/fr/a-propos-de-la-convention-sur-les-zones-humides>. Consultés le 22 novembre 2023.

## La sobriété comme rempart ?

Si la réouverture des mines est envisagée par de nombreux pays européens, l'impensé du règlement européen sur les matériaux critiques reste la sobriété<sup>43</sup>. Pourtant, la parution du troisième volet du sixième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), en avril 2022, a mis en exergue la nécessité de la sobriété<sup>44</sup> dans la lutte contre le changement climatique, aux côtés des autres piliers (efficacité énergétique, déploiement des technologies bas-carbone, etc.). Définie comme « un ensemble de mesures et de pratiques quotidiennes qui évitent une demande en énergie, en matières premières, en terres et en eau, tout en assurant le bien-être de tous dans le respect des limites planétaires », la sobriété reste peu abordée dans l'ensemble des développements législatifs européens.

De manière générale, les trajectoires de transition bas-carbone, comme celles de l'AIE, ont intégré tardivement la problématique des matériaux. Elles restent généralement cantonnées à des visions techno-centrées ne mentionnant que très peu les facteurs de blocage inhérents aux matériaux, aux bouleversements géopolitiques ou à l'acceptabilité. L'invasion de l'Ukraine par la Russie en février 2022 a remis sur le devant de la scène les questions de dépendance énergétique et, *in fine*, la sobriété comme solution de gestion de la crise énergétique européenne à court terme. Pourtant, aucune mesure sur la sobriété en matière de matériaux ne transparait dans le CRMA, alors qu'un objectif de réduction de la demande pourrait se révéler pertinent pour réduire la dépendance de l'UE. L'approche européenne d'autonomie stratégique et de relance des activités minières et métallurgiques ne rompt ainsi pas avec l'approche extractive classique. Couplés au *Net Zero Industry Act*<sup>45</sup>, ces outils de politiques ont été notamment conçus pour répondre à l'IRA américain et n'interrogent en aucun cas les modes de (sur)consommation actuels.

---

43. HACHE Emmanuel *et alii*, « Sobriété : impensé de la politique européenne sur les matériaux critiques », *The Conversation*, 9 juillet 2023. URL : <https://theconversation.com/la-sobriete-impense-de-la-politique-europeenne-sur-les-materiaux-critiques-209077>. Consulté le 22 novembre 2023.

44. Le terme *sufficiency* est utilisé dans le rapport du GIEC ; voir *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. The Working Group III Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report. Summary for Policymakers*, Genève : GIEC, 2022. URL : <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. Consulté le 22 novembre 2023.

45. Présenté sur le site de la Commission européenne. URL : [https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/net-zero-industry-act\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/net-zero-industry-act_en). Consulté le 22 novembre 2023.

## Quels futurs pour l'insécurité minérale européenne ?

Face aux enjeux de la transition bas-carbone mondiale et aux incertitudes économiques, technologiques et géopolitiques<sup>46</sup>, la question des matières premières stratégiques constitue un enjeu essentiel. Piliers du développement des équipements bas-carbone, elles pourraient en constituer une limite dans un monde en voie de décarbonation. Pour l'UE, les enjeux sont multiples et se situent autour d'une possible réindustrialisation du territoire et d'une relance des activités minières. La possibilité pour l'UE d'imposer de nouvelles normes environnementales à ces industries constitue à l'avenir une possible alternative au modèle chinois dans ce domaine, et un possible levier de puissance. Les trajectoires potentielles d'organisation des marchés de métaux critiques, les dynamiques de décarbonation et le niveau de coopération internationale constituent des facteurs majeurs d'incertitude pour les scénarios futurs.

Dans ce contexte, nous réduisons la complexité à deux variables. La première interroge le degré d'acceptabilité des projets métallurgiques et miniers en Europe. La seconde questionne le degré de cartellisation futur des marchés de matières premières critiques. Le croisement de ces deux axes permet d'envisager quatre scénarios distincts : 1) acceptabilité-marchés libres ; 2) acceptabilité-cartel ; 3) faible acceptabilité-marchés libres ; 4) faible acceptabilité-cartel. En voici les grandes lignes :

**1) Mines 4.0 :** dans ce premier scénario, la souveraineté européenne est portée par une politique industrielle ambitieuse alliant R&D, incitations à la relocalisation et constitution d'un champion européen qui renforce sa capacité à extraire et produire sur son territoire. Développant des normes minières environnementales fortes et une économie circulaire, l'UE exporte progressivement son *leadership* minier international et concurrence peu à peu la Chine sur les terrains miniers étrangers. Les développements miniers dans de nombreux pays occidentaux sont vecteurs d'un renouveau du dialogue entre l'ensemble des pays producteurs, synonyme de la création d'une agence internationale pour les métaux et les minerais. L'intégration de critères environnementaux plus contraignants provoque une hausse mondiale des prix des métaux.

---

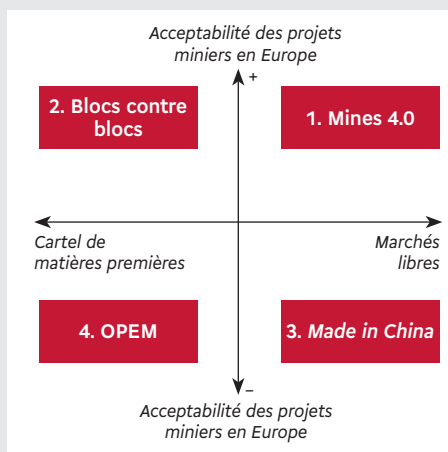
46. CRIQUI Patrick et HACHE Emmanuel, « Garder le cap de la transition énergie-climat. Prospective dans l'incertitude », *Futuribles*, n° 455, juillet-août 2023, p. 5-26.

**2) Blocs contre blocs :** dans ce deuxième scénario, l'UE développe des capacités de production sur son territoire, soutenues par sa politique industrielle et minière dans un contexte de cartellisation des marchés. Lithium, cobalt et nickel sont au centre des discussions entre les pays producteurs des pays du Sud et la Chine. Cette dernière continue sa politique de restrictions au cas par cas, ce qui provoque des pénuries partielles sur les marchés. Toutefois, le dynamisme minier retrouvé dans les pays occidentaux, et les alliances occidentales avec les eldorados miniers australiens et canadiens alimentent la demande européenne. Les chaînes de valeur industrielles sont fragmentées entre un bloc chinois et un bloc occidental, ce qui induit une hausse des coûts de la transition, renforcée par le risque d'une cartellisation étendue des marchés.

**3) Made in China :** dans ce troisième scénario, la hausse des coûts de l'énergie, le manque de coordination industrielle entre États membres et la faible acceptabilité des projets empêchent le renouveau du secteur minier en Europe. Les compétences, les financements et la volonté politique manquent, et seules les politiques de recyclage vont dans le sens de la sécurisation des besoins, mais elles restent limitées. La Chine a accru son pouvoir de marché sur le raffinage et ses participations minières à l'étranger lui permettent d'exercer un rôle prédominant dans le secteur des technologies bas-carbone. L'Europe dépend de Pékin mais également des États-Unis pour ses approvisionnements, ce qui rappelle sa dépendance passée aux hydrocarbures.

**4) OPEM (Organisation des pays exportateurs de métaux) :** dans ce dernier scénario, la faible acceptabilité de l'industrie minière en Europe se conjugue avec un mouvement de cartellisation sur les marchés mondiaux. À l'image de l'OPEP en 1973, les pays producteurs transforment la physionomie des marchés. Les matières premières deviennent un vecteur de puissance internationale. Pénurie et conflits autour des concessions minières sont monnaie courante. Des politiques de sobriété contrainte sont mises en place en Europe. ■

Graphique 2. Matrice des scénarios présentés



# La société face aux avancées des sciences et des techniques

## Le cas de l'intelligence artificielle et de la génétique

Par *Virginie Courtier-Orgogozo*<sup>1</sup> et *Laurence Devillers*<sup>2</sup>

---

*Les avancées scientifiques et technologiques font régulièrement la une des médias, comme en témoignent, par exemple, les nombreux articles et commentaires autour des progrès de l'intelligence artificielle (IA), en particulier depuis le lancement du célèbre ChatGPT fin 2022. Cependant, au-delà des anecdotes sur la façon dont peut être utilisé un agent conversationnel comme ChatGPT et sans contester les questions soulevées par ses usages au quotidien, les individus sont-ils bien et suffisamment informés sur cette nouvelle technologie qu'est l'IA ? Disposent-ils d'une vision claire et précise leur permettant d'envisager les enjeux multiples et majeurs qui s'y rapportent ? De même s'agissant des avancées en matière de génétique : sait-on précisément où en est la recherche et quelles sont les applications potentielles qui pourraient en découler dans les années à venir (y compris grâce à l'IA) ?*

*Dans ces deux domaines scientifiques majeurs pour notre avenir, comme dans de nombreux autres, nous sommes certes informés, mais parfois de manière parcellaire, incomplète, et sans un certain nombre de précautions pourtant indispensables. Face aux idées reçues et pour réconcilier les individus avec une science qu'ils ont parfois tendance à regarder avec défiance, il est essentiel de leur fournir des éléments de compréhension précis, de leur dire ce que l'on sait (ou pas) des technologies en cours de développement, de leur montrer les enjeux, les limites, le tout de manière la plus pédagogique possible.*

---

1. Directrice de recherche CNRS (Centre national de la recherche scientifique), spécialisée sur les mécanismes de l'évolution, la génétique et le forçage génétique ; professeure associée à l'École polytechnique ; professeure attachée à la chaire Biodiversité et écosystèmes du Collège de France ; et conseillère scientifique de Futuribles International.

2. Professeure et chercheuse, spécialiste des interactions humain-machine ; enseignante à Sorbonne Université et membre du LIMSI (Laboratoire d'informatique pour la mécanique et les sciences de l'ingénieur) / CNRS ; membre du CNPEN (Comité national pilote d'éthique du numérique).

*C'est ainsi qu'ils pourront disposer des clefs nécessaires pour se faire une opinion documentée et non mystifiée des enjeux sociétaux qui se rapportent à ces technologies. Dans cet article, les chercheuses Virginie Courtier-Orgogozo et Laurence Devillers explorent ces enjeux pédagogiques, au travers des exemples des progrès de la génétique et de l'IA, et proposent des pistes « pour mieux armer le grand public face aux avancées scientifiques et technologiques ». S.D.*

**D**ans un monde de plus en plus complexe et technologique, où les avancées sont de plus en plus rapides, le grand public peine parfois à saisir les enjeux et les éléments clefs pour comprendre et utiliser au mieux les nouvelles technologies. Après avoir explicité les raisons générales de ce décrochage, et l'intérêt d'une société bien formée aux technologies, nous présenterons quelques exemples de compréhension erronée des systèmes d'intelligence artificielle (IA) et des biotechnologies en génétique, qui peuvent conduire la société à prendre de mauvaises décisions. Puis nous proposerons quelques pistes pour mieux armer le grand public face aux avancées scientifiques et technologiques.

## Un décrochage manifeste

Si dans certaines régions du monde, le manque d'éducation du grand public aux nouvelles technologies peut s'expliquer par un manque de ressources ou même par la volonté délibérée de certains gouvernements autoritaires de tenir la population à l'écart afin de mieux contrôler la diffusion de l'information et de prévenir les mobilisations, dans les pays riches à régime démocratique, les raisons de ce décrochage sont autres et multiples.

D'une part, l'inertie institutionnelle et le manque de compréhension des enjeux peuvent ralentir les politiques et les programmes d'éducation aux nouvelles technologies. Ce phénomène est d'autant plus important que les technologies évoluent de plus en plus vite. D'autre part, certaines entreprises technologiques peuvent parfois hésiter à éduquer le public sur les failles de sécurité ou les préoccupations liées à la vie privée de leurs produits, afin de protéger leurs intérêts commerciaux et de ne pas nuire à leur image de marque. Il est parfois avancé également que certaines technologies actuelles sont trop complexes pour être comprises par le citoyen lambda. Nous récusons cette idée et pensons au contraire qu'il est tout à fait possible aujourd'hui de mieux former le grand public



© ID-EasyDoor / Shutterstock

aux nouvelles technologies et enjeux associés, en améliorant la vulgarisation, les moyens de communication et la prise de conscience de chacun.

Face à la désinformation, aux manipulations de l'information et aux informations contradictoires, une personne ayant un esprit critique et un savoir avancé saura mieux réagir, s'adapter aux changements technologiques en cours, participer activement à la société et prendre des décisions éclairées sur des questions touchant à sa vie privée, telles que le choix entre plusieurs traitements médicaux potentiels, la sécurité en ligne, un vote électoral ou la protection de la vie privée. Une meilleure compréhension des sciences et technologies qui nous entourent permettra également de réduire l'anxiété et de vivre de manière plus sereine. De plus, une société bien éduquée aux sciences est mieux préparée à participer activement à des débats publics sur des questions scientifiques et technologiques, telles que la réglementation de nouvelles technologies ou la gestion des ressources naturelles. Enfin, de nombreux problèmes mondiaux, comme le changement climatique, la crise de la biodiversité, la sécurité alimentaire ou l'accès à l'eau potable, exigent vraisemblablement des solutions plurielles comportant une part à la fois scientifique et technologique. Une population bien éduquée est plus en mesure de pouvoir contribuer à la résolution de ces problèmes. Une des voies essentielles pour nos sociétés est donc de mieux former les citoyens et les politiques aux nouvelles technologies et aux enjeux associés.

## Dans le domaine de l'IA

### *L'IA est-elle intelligente ?*

L'intelligence artificielle (IA) est un ensemble de théories, d'algorithmes et de logiciels qui ont pour objectif de simuler certaines capacités cognitives de l'être humain, comme les capacités d'apprentissage, de perception, d'aide à la décision et de génération. Pour l'instant, les programmes d'IA sont plutôt performants pour la perception et la génération, mais ils n'ont pas de capacités de raisonnement semblables à celles d'un être humain pour décider. Ils ne forment pas des concepts, ne comprennent pas ce qu'ils pro-

duisent et n'appliquent pas de logique au sens humain. Ils sont, en revanche, capables d'apprendre et de généraliser, certes de façon très différente des êtres humains.

Il existe de nombreux types de modèles utilisés en apprentissage machine (*machine learning* en anglais) comme les arbres de décision, la classification bayésienne, les réseaux de neurones, etc. L'apprentissage machine à partir d'une structure de type réseau de neurones artificiels, cherche à imiter de façon très simplifiée notre fonctionnement cérébral. Warren McCulloch et Walter Pitts proposent le premier neurone artificiel en 1943, c'est un modèle très simplifié du neurone biologique. L'apprentissage de la machine repose sur l'idée de plasticité cérébrale décrit par la « règle de Hebb » en 1947, c'est-à-dire la capacité des neurones à modifier de façon durable l'efficacité de leur connexion synaptique représentée par des poids (des réels) dans les réseaux artificiels. Le premier réseau capable d'apprendre des fonctions complexes est le perceptron multicouche avec l'algorithme de rétropropagation du gradient d'erreur ; il date de 1987. Les dernières avancées qui ont bouleversé les performances obtenues en apprentissage machine sont dues principalement à l'augmentation des capacités de calcul, à l'accès à de gigantesques ensembles de données et à des algorithmes de plus en plus sophistiqués, comme les algorithmes neuronaux d'apprentissage profond ou *deep learning* (2010) et les *transformers*<sup>3</sup> (2017).

Deux types majeurs d'algorithmes neuronaux existent : les systèmes d'IA prédictive et ceux d'IA générative. L'utilisation du *deep learning* pour la reconnaissance d'images de chats est un exemple de **système d'IA prédictive**. En effet, ce type d'IA est formé sur des données existantes (dans ce cas, des images de chats) et utilise ces informations pour prédire ou classer de nouvelles données (par exemple, déterminer si une nouvelle image contient un chat ou non). Dans ce contexte, l'IA prédictive est utilisée pour prédire la présence d'un chat dans une image donnée. Pour entraîner ce type d'IA, l'ingénieur en apprentissage automatique écrit un programme qui implémente un réseau de neurones. Les paramètres du modèle, les poids du réseau de neurones, sont initialement définis de manière aléatoire. Pendant la phase d'apprentissage, ces paramètres sont ajustés en fonction des données d'entraînement

---

3. Transformeur (ou modèle autoattentif) : modèle d'apprentissage profond utilisé principalement dans le domaine du traitement automatique des langues. Voir VASWANI Ashish *et alii*, « Attention Is All You Need », ArXiv, Cornell University, 12 juin 2017 (mis à jour le 2 août 2023). URL : <https://arxiv.org/abs/1706.03762>. Consulté le 30 novembre 2023.

fournies (cette phase peut être très longue avec un énorme corpus) pour minimiser l'erreur entre les prédictions du modèle et les valeurs cibles. Dans notre exemple, les données d'entraînement sont des corpus d'images de chats et d'images sans chat, et les valeurs cibles, les classes « chat » ou « autres ». L'apprentissage profond permet à une IA d'apprendre à partir de grandes quantités de données, bien au-delà de ce qu'un cerveau humain pourrait traiter. Ces IA, grâce au traitement de ces masses de données, peuvent résoudre des problèmes complexes comme la détection précoce de tumeur cancéreuse dans des radios qui seraient autrement impossibles à détecter par l'œil humain. Cet apprentissage laborieux n'a en tout cas rien à voir avec la façon dont un enfant apprend très rapidement, par exemple en touchant ou en goûtant.

**Les systèmes d'IA générative** <sup>4</sup> sont des approches différentes de production du texte, des images, des programmes, etc. Ils répondent à des invites ou requêtes (appelés *prompts*) en produisant de nouvelles données — par exemple la séquence de mots la plus probable après le *prompt* —, à partir de caractéristiques communes apprises sur un corpus de données de textes de très grande taille. Ces systèmes se servent de modèles de fondation qui permettent de produire un résultat présentant un certain degré de similarité avec les données d'apprentissage qui ont servi à le construire. Un modèle de fondation (*foundation model*), appellation introduite par l'université de Stanford, est un modèle de grande taille fondé sur une architecture de réseau de neurones profond, entraîné par apprentissage autosupervisé sur une grande quantité de données non annotées. Ces systèmes utilisent l'hypothèse distributionnelle, qui stipule que le sens d'un mot peut être déduit de son contexte, c'est-à-dire des mots voisins. Les entités du modèle de fondation (appelées *tokens*) peuvent être des suites de caractères qui ne sont pas forcément des mots de la langue mais seulement des parties de mot. Le modèle génératif apprend à prédire l'entité suivante dans une phrase, puis l'entité suivante et ainsi de suite, un peu comme la fonction de complétion automatique sur un clavier.

Il est important de noter que les systèmes d'intelligence artificielle, qui sont fondés sur des techniques d'apprentissage machine, génèrent des modèles qui expriment des corrélations statistiques entre les éléments des données (comme des parties de mot ou des

---

4. « Systèmes d'intelligence artificielle générative : enjeux d'éthique », Avis n° 7, CNPEN, 30 juin 2023. URL : [https://www.ccne-ethique.fr/sites/default/files/2023-09/CNPEN\\_avis7\\_06\\_09\\_2023\\_web-rs2.pdf](https://www.ccne-ethique.fr/sites/default/files/2023-09/CNPEN_avis7_06_09_2023_web-rs2.pdf). Consulté le 30 novembre 2023.

parties d'image) utilisées pour leur entraînement. Les représentations internes de ces modèles sont cependant difficiles à interpréter par les humains.

Les systèmes d'IA générative comme le *chatbot*<sup>5</sup> ChatGPT utilisent une combinaison des trois techniques d'apprentissage statistique à différentes étapes. Tout d'abord, l'apprentissage autosupervisé est utilisé pour produire les modèles de fondation sans annotation *a priori*. Ensuite, l'apprentissage supervisé est utilisé pour affiner ces modèles en les entraînant sur des données spécifiques et en filtrant certains résultats. Enfin, l'apprentissage par renforcement est utilisé pour optimiser les performances du système en sélectionnant les meilleurs résultats. Dans la méthode RLHF (*Reinforcement Learning with Human Feedback*), l'apprentissage par renforcement est utilisé pour aligner les résultats avec les préférences exprimées par les annotateurs humains lors de la phase supervisée<sup>6</sup>. L'objectif est de faire en sorte que ces réponses soient en accord avec les valeurs humaines, même si les systèmes ne comprennent pas la signification de ces valeurs.

Les IA génératives ne distinguent pas ce qui est possible de ce qui est impossible, ni ce qui est vrai de ce qui est faux. Elles peuvent produire des sorties combinant des assertions vraies et des assertions fausses, des résultats inattendus, parfois qualifiés d'hallucinations, ou conduire à des émergences de comportements. La vérification de ce qui est vrai ou faux n'est pas toujours facile, d'autant plus que le modèle de fondation, par construction, ne produit aucune référence aux sources. Des méthodes pour attribuer des sources aux textes générés sont soit un module spécial inclus dans le modèle (comme dans Bing de Microsoft), soit un moteur de recherche supplémentaire (comme le modèle Alfred de la *start-up* française LightOn). Les résultats produits par les systèmes d'IA générative sont souvent indiscernables de ceux produits par un humain.

Ces IA génératives sont très puissantes et peuvent être adaptées à différentes applications en peu de temps. Elles sont multitâches, multimodales et multilingues, et peuvent générer des images, de la musique, des paroles, des programmes ou des synthèses de textes.

---

5. Un *chatbot* est un agent conversationnel. Voir « Agents conversationnels : enjeux d'éthique », Avis n° 3, CNPEN, 15 septembre 2021. URL : [https://www.ccne-ethique.fr/sites/default/files/2022-02/Avis\\_n°3\\_agents\\_conversationnels\\_enjeux\\_d%27éthique.pdf](https://www.ccne-ethique.fr/sites/default/files/2022-02/Avis_n°3_agents_conversationnels_enjeux_d%27éthique.pdf). Consulté le 30 novembre 2023.

6. Cf. le recours aux modérateurs kenyans par la société OpenAI. Voir PERRIGO Billy, « Exclusive: OpenAI Used Kenyan Workers on Less Than \$2 Per Hour to Make ChatGPT Less Toxic », *Time Magazine*, 18 janvier 2023. URL : <https://time.com/6247678/openai-chatgpt-kenya-workers/>. Consulté le 30 novembre 2023.



© Giulio Benzin / Shutterstock

La formation de ces modèles consomme beaucoup de ressources et peut prendre plusieurs semaines sur d'énormes centres de calcul. C'est un domaine de recherche très actif pour rendre ces processus plus efficaces et respectueux de l'environnement.

### *Perception de l'IA : fantasmes et réalité*

Devant les progrès impressionnants de l'IA, on peut être tenté de la considérer comme une intelligence quasi humaine, mais l'IA ne peut pas expliquer les résultats qu'elle produit et elle reste dépendante des données sur lesquelles elle se fonde. Actuellement, dans le domaine public, l'intelligence artificielle passe pour une entité intelligente au sens humain du terme, pour un outil technologique qui détient la vérité. Cette idée monopolise la plupart des questionnements associés à l'IA et camoufle les vrais enjeux : l'accroissement de la désinformation, des inégalités et l'épuisement de la planète. Comment l'IA façonne-t-elle notre compréhension de nous-mêmes et de nos sociétés ?

Face à la montée rapide de l'IA, plusieurs personnes — dont le chercheur Yoshua Bengio qui a reçu le prix Turing — ont appelé à un moratoire volontaire sur son développement, afin de fournir plus de temps à la société pour évaluer les risques associés<sup>7</sup>. Mais un tel moratoire semble irréalisable dans la situation actuelle : les avantages potentiels de l'IA sont trop importants et nos sociétés sont trop compétitives, tant sur le plan interne qu'entre elles. Comme le montre très bien Kate Crawford<sup>8</sup>, l'IA est une technologie d'extraction : des minéraux extraits de la terre à la main-d'œuvre tirée des travailleurs de l'information à bas salaire, en passant par les données extraites de chaque action et interaction avec les machines.

7. PIQUARD Alexandre, « Elon Musk et des centaines d'experts réclament une "pause" dans le développement de l'intelligence artificielle », *Le Monde*, 29 mars 2023. URL : [https://www.lemonde.fr/economie/article/2023/03/29/elon-musk-et-des-centaines-d-experts-reclament-une-pause-dans-le-developpement-de-l-ia\\_6167461\\_3234.html](https://www.lemonde.fr/economie/article/2023/03/29/elon-musk-et-des-centaines-d-experts-reclament-une-pause-dans-le-developpement-de-l-ia_6167461_3234.html). Consulté le 30 novembre 2023. (Voir également SOUPIZET Jean-François, « Un appel à la pause dans le développement de l'IA », *Futuribles*, n° 455, juillet-août 2023, p. 99-103 [NDLR].)

8. CRAWFORD Kate, *Atlas of AI*, New Haven : Yale University Press, 2021.

Internet est un réseau planétaire qui pourrait alimenter une évolution vers une gouvernance non démocratique. L'IA a le potentiel de manipuler l'information et de centraliser le pouvoir. Les entreprises technologiques utilisent d'ailleurs aujourd'hui cette capacité de l'IA pour remodeler le monde, en s'en cachant à peine. L'Américain Sam Altman, PDG et cofondateur d'OpenAI (à l'origine de ChatGPT), projette de développer une intelligence artificielle générale (IAG) qui aurait les mêmes capacités qu'un « humain médian », voire des capacités supérieures, et pourrait ainsi être embauchée pour n'importe quel emploi. Par cette vision, Sam Altman semble clairement afficher son intention de remplacer de nombreux humains dans différents métiers par la technologie.

Le grand public a découvert ces derniers mois la puissance de ChatGPT, cet agent conversationnel développé par OpenAI, grâce auquel on gagne souvent beaucoup de temps en cherchant des informations. Pour les chercheurs, le lancement de ChatGPT n'est qu'une étape dans une longue histoire de recherches sur l'IA. Le modèle de langage interne de ChatGPT est fondé sur un système d'IA générative de type *transformer* proposé par Google en 2017. Mais pour le grand public, c'est une véritable rupture. Chacun a pu se rendre compte de la puissance de cet outil qui simule notre langage. Le fait que ChatGPT puisse produire de l'audio, du récit, de l'image, de la vidéo, et également du code informatique, oblige à reconnaître la puissance des systèmes d'IA générative. Face à ChatGPT, les individus se sentent à la fois démunis, enthousiastes et inquiets pour le futur, qu'il s'agisse du devenir de leur métier ou de l'éducation scolaire de leurs enfants.

L'IA générative pourrait certes rendre un grand nombre de services dans de nombreux métiers. Sur des tâches administratives un peu pénibles, elle fait gagner du temps, même s'il faut souvent vérifier. Il est évident qu'il sera difficile de s'en passer. Pour autant, ChatGPT est loin d'être parfait. C'est une machine incapable de raisonner dans la temporalité, comme elle est incapable de raisonner dans notre espace 3D. Ses performances informationnelles ne doivent pas occulter la réalité des capacités de ses systèmes. Ce que la machine apprend reste assez abstrait mais n'a rien à voir avec notre compréhension du monde. La machine est performante parce qu'elle manipule beaucoup de données ; plus elle utilise de données, plus elle donne l'impression de répondre de manière intelligente. Nos façons d'apprendre sont très différentes ; les enfants apprennent en touchant et en expérimentant, alors que l'IA apprend statistiquement sans raisonnement, en observant les répétitions.

La vitesse du traitement algorithmique des masses d'informations numérisées fait cependant de ChatGPT un outil vertigineux pour des citoyens de plus en plus livrés à la pression du temps et à des rythmes de vie accélérés. Depuis Turing qui voulait créer des machines pensantes, depuis les sciences cognitives ou la cybernétique..., avons-nous vraiment évolué dans la compréhension des IA dans la société ? Comme les machines parlent aujourd'hui de mieux en mieux, on leur associe des connaissances, une conscience, des affects, à l'image des robots qui se substituent aux amoureux absents. Beaucoup de gens ont des sentiments d'anxiété ou de peur face à ces machines. Pour limiter les inquiétudes, il semble important d'aborder l'IA de manière plus pragmatique : en parler à l'école, expérimenter, s'approprier les outils, les questionner, apprendre à comprendre comment ils fonctionnent.

### ***Potentiels et limites de l'IA à plus long terme***

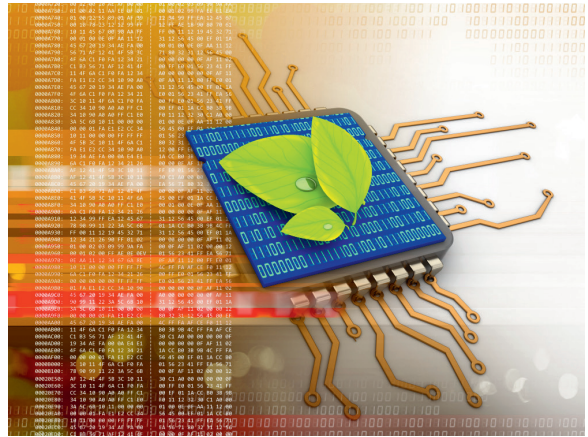
Les scientifiques ont compris le potentiel de l'IA pour changer la science. Mais rares sont ceux qui ont une vision à long terme, intégrant à la fois les dépenses d'énergie et de matière, ainsi que les conséquences sociétales du développement de ces recherches. L'IA peut déjà coder des programmes informatiques, dessiner des images et prendre des notes mais, bien plus que cela, l'IA promet de bouleverser l'économie de la connaissance. En médecine, l'IA permet d'accélérer les processus de recherche et d'invention de nouveaux médicaments pour les maladies négligées car trop rares, des vaccins contre de nouveaux virus pour lesquels il fallait jusque-là des années pour trouver des solutions. L'IA est également une aide précieuse pour le médecin, par exemple pour prédire le devenir d'un cancer agressif ou pour diagnostiquer des cardiopathies valvulaires. Cependant, il est nécessaire de prendre en compte, dans l'équation de l'innovation, les dépenses d'énergie et de matière nécessaires pour mener tous ces travaux et pour résoudre des problèmes allant de la maladie au changement climatique. Pouvons-nous imaginer que les systèmes d'IA puissent continuellement réanalyser les données et mettre à jour les résultats sur les maladies, ou les changements environnementaux, au fur et à mesure qu'ils se produisent, mais cela sans y intégrer les coûts d'énergie et de matière pour la société ?

L'application de l'IA aux structures tridimensionnelles des protéines <sup>9</sup> bénéficie de grandes bases de données. Cette technologie

---

9. TUNYASUVUNAKOOL Kathryn, « Highly Accurate Protein Structure Prediction for the Human Proteome », *Nature*, vol. 596, n° 7873, p. 590-596, 2021. URL : <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03828-1>. Consulté le 30 novembre 2023.

est proche de celle utilisée par les générateurs d'images d'IA les plus populaires, comme DALL-E. Les scientifiques ont passé des décennies et dépensé des milliards de dollars pour caractériser expérimentalement les structures 3D de nombreuses protéines, et regrouper toutes ces



© Mmaxer / Shutterstock

informations en une base de données massive qu'il est possible de donner à étudier à l'IA. L'IA est aujourd'hui utilisée pour concevoir la structure 3D de nouvelles protéines. Les chercheurs les fabriquent ensuite en laboratoire pour voir si elles fonctionnent réellement. La forme d'une protéine détermine souvent son efficacité. Cependant, il est loin d'être certain que tous les domaines scientifiques bénéficieront de la même manière de l'IA. Le manque de données et la complexité de différents domaines les rendent plus difficiles à étudier que les protéines à l'aide de l'IA. Cependant, des systèmes sont activement développés dans les domaines de la génétique, de l'étude du climat, de la physique des particules.

Les 100 dernières années de recherche scientifique ont été marquées par une grande sérendipité — de nombreuses découvertes sont le fruit du hasard. L'IA apparaît aujourd'hui comme un accélérateur pour faire avancer la recherche médicale, spatiale, mais également optimiser les dépenses d'énergie. Les progrès récents dans le développement du modèle d'IA générative (*Large Language Model* / LLM pour un modèle de fondation sur le texte) révèlent son étonnante capacité dans diverses tâches de calcul sur du texte, des images, etc. Dans le domaine de la psychologie par exemple, l'utilisation d'agents conversationnels utilisant des IA génératives est testée pour détecter les capacités fondamentales de la théorie de l'esprit à attribuer des états mentaux tels que les croyances, les émotions, les désirs, etc. Ce genre d'outil nécessite des normes et une loi sur l'IA pour être déployé afin d'éviter la manipulation cognitive.

### **Enjeux d'éthique et de transparence**

Il est important de reconnaître les avantages potentiels de l'utilisation de modèles de langage d'IA dans la rédaction et la recherche scientifique, concernant notamment la bibliographie et la prépa-

ration de manuscrits. L'IA est peut-être un bon outil pour nous permettre de faire de nouvelles découvertes scientifiques à partir de la littérature scientifique, mais il y aura toujours nécessité de tester ensuite les idées scientifiques issues de l'IA pour savoir si elles sont valables ! De plus, des études montrent qu'il est possible de créer de toutes pièces des articles scientifiques frauduleux, très ressemblants à des originaux. Si, de prime abord, un article peut sembler convaincant, il faut être vigilant pour détecter certaines failles. En effet, des experts mettent souvent en avant la présence de certaines inexactitudes sémantiques et des erreurs dans les références.

En conséquence, il faut rappeler l'importance d'une vigilance accrue et de meilleures méthodes de détection pour lutter contre l'utilisation potentiellement abusive de l'IA dans la recherche scientifique. Les transformations technologiques sont en train d'arriver dans tous les domaines, de la vie privée à la vie politique en passant par la vie professionnelle, en mettant en lumière de nombreux problèmes éthiques. Le lien entre la vitesse de l'innovation technologique, le temps pour la réflexion sociétale et les intérêts économiques est au centre du problème éthique. Ce décalage est susceptible de générer pendant plusieurs années des tensions. Il est nécessaire de mener des recherches sur ces IA génératives ouvertes. Alors que l'impact sociétal des modèles de fondation augmente, la transparence de ces modèles diminue, et ils pourraient devenir tout aussi opaques que les plates-formes de médias sociaux. Il est essentiel d'inverser cette tendance : la transparence est une condition préalable essentielle à la responsabilité publique, à l'innovation scientifique et à une gouvernance efficace.

Les grandes entreprises américaines qui produisent des IA génératives comme ChaGPT d'OpenAI, Bing de Microsoft, Bard de Google, Llama de Meta, etc. sont bien connues du grand public. Les entreprises montantes en France comme MistralAI ou LightOn (Alfred) se spécialisent dans le développement de modèles de langage à grande échelle. En 2021, LightOn a lancé PAGnol (où PAG signifie pré-apprentissage génératif), le plus grand modèle de langue française, puis Alfred une IA conversationnelle et un LLM en source ouverte pour les entreprises. En 2023, ils ont lancé également Paradigm, une plate-forme d'IA générative pour les grandes entreprises.

L'impact environnemental du développement extrêmement rapide du numérique implique de mesurer le coût énergétique, et plus généralement l'empreinte environnementale des systèmes d'IA

généraliste et des modèles de fondation, afin de les inscrire dans la transition écologique. Ces exigences ne sont pas respectées par la plupart des modèles de fondation actuels. Des chercheurs de l'université de Stanford ont constaté que « les fournisseurs de modèles de fondation ne rendent pas compte de manière cohérente de l'utilisation de l'énergie, des émissions, de leurs stratégies de mesure des émissions et des mesures prises pour atténuer les émissions <sup>10</sup> ».

Un laboratoire de recherche à but non lucratif consacré à l'intelligence artificielle générative vient d'être lancé en France, en novembre 2023, par le fondateur de Free (Xavier Niel), avec une mise de fonds à hauteur de 300 millions d'euros <sup>11</sup>. Ce laboratoire appelé Kyutai (« sphère » en japonais) est financé à parts égales par Xavier Niel, Éric Schmidt, l'ancien directeur général de Google, et Rodolphe Saadé, le patron de la compagnie de transport maritime CMA-CGM (Compagnie maritime d'affrètement-Compagnie générale maritime). Souhaitons que cette initiative soit le début d'une ambition de développement positif et responsable de l'IA générative, prenant en compte les facteurs économiques, mais aussi écologiques, sociétaux et éthiques.

## Dans le domaine de la génétique

### *Les gènes n'ont pas tout pouvoir*

Concernant la génétique, généralement le grand public a tendance à penser que tout est écrit dans les gènes et à attribuer un pouvoir trop grand aux facteurs génétiques <sup>12</sup>. Par exemple, quand dans les années 2004-2006, la société californienne Genetic Savings & Clone a proposé de recréer par clonage des chats identiques à partir de matériel génétique <sup>13</sup>, plusieurs personnes — fortunées — qui avaient un animal de compagnie exceptionnel mais vieillissant ont sollicité ses services. Même si la compagnie a suscité de nombreuses questions éthiques <sup>14</sup> et a dû mettre la clef sous la porte

---

10. BOMMASANI Rishi *et alii*, « Do Foundation Model Providers Comply with the Draft EU AI Act? », HAI (Human-centered Artificial Intelligence), université de Stanford, 2021. URL : <https://crfm.stanford.edu/2023/06/15/eu-ai-act.html>. Consulté le 30 novembre 2023.

11. MARIN Jérôme, « Xavier Niel lance Kyutai, un laboratoire d'intelligence artificielle à but non lucratif », *CaféTech*, 20 novembre 2023. URL : <https://cafetech.fr/2023/11/20/xavier-niel-lance-kyutai-un-laboratoire-dintelligence-artificielle-a-but-non-lucratif/>. Consulté le 30 novembre 2023.

12. MUNNICH Arnold, *Programmé mais libre. Les malentendus de la génétique*, Paris : Plon, 2016.

13. Page d'accueil de l'entreprise Genetic Savings & Clone (archivée sur Internet Archive) : <https://web.archive.org/web/20060429204721/http://savingsandclone.com/index.html>. Consultée le 30 novembre 2023.

14. « Dead Cats to Remain a Memory », *Wired*, 12 octobre 2006. URL : <https://www.wired.com/2006/10/dead-cats-to-remain-a-memory/>. Consulté le 30 novembre 2023.

suite à des problèmes financiers en 2006, la question de savoir si un chat cloné allait forcément être identique au chat initial ne s'est pas posée dans l'esprit du grand public. Or, chaque être vivant est le résultat à la fois de son



© Wichy / Shutterstock

génomique et de l'environnement dans lequel il a vécu jusqu'à présent. L'environnement est défini ici au sens large comme tous les paramètres autres que la séquence d'acide désoxyribonucléique (ADN) : l'alimentation, les expositions à des agents pathogènes chimiques ou naturels, l'environnement social et culturel, l'éducation, la *stress*, etc. Les caractéristiques d'un individu ne sont pas définies uniquement par la séquence de son ADN.

En fait, l'ADN seul est une molécule inerte. Ce n'est que dans un environnement particulier, au sein d'une cellule et en contact avec toute une machinerie moléculaire que l'ADN peut transmettre des informations qui contribueront à faire émerger des propriétés particulières visibles à l'échelle de l'individu. Certains effets potentiels de l'ADN ne s'observent que dans des conditions environnementales particulières. Par exemple, des humains porteurs de variants génétiques associés à une faible capacité à synthétiser la vitamine D peuvent présenter une santé osseuse et immunitaire diminuée dans des environnements où l'exposition au soleil est limitée, mais ces effets de l'ADN sont « guéris » en vivant dans des régions plus ensoleillées ou grâce à des suppléments de vitamine D. Dans de nombreux cas, la génétique n'impose pas un destin inexorable : il est bien souvent possible d'aller à l'encontre de la génétique en modifiant certains paramètres de l'environnement. Tout le monde a à l'esprit des maladies monogéniques (causées par des mutations dans un seul gène) telles que certaines myopathies et autres maladies génétiques neuromusculaires, que les médias mettent en lumière chaque année, en France, au moment du Téléthon. Mais hormis ces quelques maladies particulières, qui sont peu influencées par l'environnement, la plupart des troubles et des caractéristiques de chaque être humain sont déterminés par une combinaison de plusieurs gènes, et fortement influencés par l'environnement et les conditions de vie. Le champion de ski finlandais

Eero Mäntyranta, qui a gagné sept médailles olympiques dans les années 1960, avait une mutation particulière dans son génome, permettant à son sang de bien mieux transporter l'oxygène<sup>15</sup>. Le fait que la plupart des autres membres de sa famille, aussi porteurs de la même mutation, n'aient pas été champions olympiques montre bien l'influence de l'environnement. Ce que nous sommes est influencé à la fois par notre ADN, par notre environnement, et par les interactions entre notre ADN et notre environnement.

Ainsi, le matériel génétique que nous possédons ouvre un ensemble de possibilités et, selon l'environnement que rencontrera notre génome au fil de notre vie, certaines de ces possibilités se développeront tandis que d'autres ne verront pas le jour. La croyance erronée et cependant répandue en la toute-puissance des gènes a profité au développement de certaines firmes, comme 23andMe, à partir de 2007 aux États-Unis. 23andMe proposait à l'époque, pour 99 dollars US, une analyse du génome et une estimation des risques de développer plus d'une centaine de maladies. Mais l'agence américaine des produits alimentaires et médicamenteux, la Food and Drug Administration (FDA), a qualifié cette publicité de « mensongère » en 2013 et 23andMe a dû renoncer à ces tests génétiques prédictifs. Aujourd'hui, 23andMe vend surtout aux particuliers des tests concernant la généalogie et a obtenu l'autorisation de détecter seulement une dizaine de maladies, pour lesquelles le lien entre génétique et prédisposition est clair.

### *La part de l'inné et de l'acquis*

Même si la question revient souvent, il est généralement impossible de savoir, pour une personne donnée, quelle est la part de l'inné et de l'acquis dans tel comportement ou telle caractéristique physique. Les gènes et l'environnement sont entremêlés et nécessaires tous les deux, de manière différente, à l'apparition de telle ou telle caractéristique. Notons aussi que les facteurs génétiques sont plus aisément détectés que les facteurs environnementaux : les séquences d'ADN représentent des données faciles à classer et à analyser car ce sont des suites de lettres, alors que les facteurs environnementaux sont quantitatifs et bien plus divers, ils se prêtent donc moins bien aux analyses.

---

15. LA CHAPELLE Albert (de), TRASKELIN Ann-Liz et JUVONEN Eeva, « Truncated Erythropoietin Receptor Causes Dominantly Inherited Benign Human Erythrocytosis », *PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America)*, vol. 90, n° 10, 15 mai 1993, p. 4495-4499. URL : <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.90.10.4495>. Consulté le 30 novembre 2023.

La recherche des causes génétiques se fait par association statistique entre certains gènes et certains traits de caractère (couleur des yeux, maladie, etc.). Prenons comme analogie le concours du meilleur croissant au beurre de France. Pour savoir quelle est la part de la recette, du cuisinier et du contexte sociétal qui explique le premier prix au concours du meilleur croissant, il faudrait pouvoir tester toutes les combinaisons possibles de ces trois paramètres. Or, nous n'avons pas accès à toutes ces possibilités. De même, les associations génétiques sont effectuées à partir d'un certain ensemble d'individus. Les résultats obtenus ne sont valables que pour la population qui a été étudiée, au moment où l'étude a été réalisée, et il n'est pas certain que les résultats obtenus s'appliquent aussi à une autre population.

Enfin, les différences génétiques identifiées ne sont pas forcément la cause : les mécanismes sous-jacents peuvent tout aussi bien être environnementaux. Par exemple, dans une société imaginaire où les enfants aux yeux bleus n'auraient pas le droit d'aller à l'école, l'illettrisme et la tendance à errer dans les rues seraient associés aux gènes de couleur des yeux <sup>16</sup>. Quand certaines particularités génétiques ont un lien très fort avec certains facteurs culturels, il n'est pas possible de distinguer la part de l'environnement et la part génétique dans ces études d'association.

### ***La difficulté à trouver les causes des maladies***

Il est difficile pour le grand public de manipuler des probabilités et des risques. Notre esprit a naturellement tendance à simplifier et à ne pas prendre en compte la variabilité intrinsèque d'un phénomène que l'on observe. De plus, ce qui intéresse une personne est généralement son propre cas, ou bien les personnes de son entourage, mais pas ce qui se passe à l'échelle d'une population. Par exemple, si un patient non fumeur atteint d'un cancer du poumon souhaite savoir comment il l'a contracté, son médecin va pouvoir, au mieux, identifier des mutations à l'origine de ce cancer, mais il ne va pas être en mesure d'identifier la ou les cause(s) exacte(s) : est-ce l'exposition aux particules fines, ou une autre cause ?

En effet, l'identification des facteurs de risque est basée sur l'étude de toute une population, sur laquelle sont réalisées diverses me-

---

16. FOUCAIT Stéphane, « En biologie, les “bons” et “mauvais” gènes font un inquiétant retour, alimentant les théories racialistes », *Le Monde*, 20 janvier 2023. URL : [https://www.lemonde.fr/idees/article/2023/01/20/en-biologie-les-bons-et-mauvais-genes-font-un-inquietant-retour-alimentant-les-theories-racialistes\\_6158611\\_3232.html](https://www.lemonde.fr/idees/article/2023/01/20/en-biologie-les-bons-et-mauvais-genes-font-un-inquietant-retour-alimentant-les-theories-racialistes_6158611_3232.html). Consulté le 30 novembre 2023.

sures statistiques. Cette approche holistique permet d'estimer par exemple le nombre de décès et de cas de cancer du poumon par an à Grenoble, ainsi que de calculer quel impact pourrait avoir une réduction du transport routier sur cette mortalité<sup>17</sup>. Mais malheureusement, ces méthodes « populationnelles » ne permettent pas d'identifier les causes individuelles du cancer pour chaque patient. Il y a, ici encore, un décalage entre ce que la science peut apporter et ce que la personne lambda voudrait pouvoir tirer de la science.



© Peshkova / Shutterstock

### **Nos connaissances en génétique restent limitées**

Grâce à la mise au point des ciseaux moléculaires CRISPR-Cas9<sup>18</sup> en 2012, il est aujourd'hui possible de modifier facilement et à bas coût la séquence d'ADN de la plupart des espèces, et d'y introduire les mutations souhaitées<sup>19</sup>. Cela laisse penser — autre idée reçue fautive — que l'on peut faire tout ce que l'on veut avec les ciseaux moléculaires CRISPR. En effet, le grand public a tendance à considérer ces ciseaux moléculaires comme une technologie de modification génétique sans nuance, ce qui peut susciter des inquiétudes quant à la création de bébés / animaux / plantes « sur mesure ».

En réalité, on connaît encore très mal les bases génétiques de certains traits de caractère. Pour la plupart des changements que l'on pourrait souhaiter apporter (des plantes qui résistent à la sécheresse et au réchauffement climatique et qui croissent bien, des plantes qui produisent des *ratios* de nutriments adaptés aux besoins humains, etc.), on ne sait pas si telle ou telle mutation va effectivement permettre de les obtenir. Souvent, les mutations introduites ont, en plus de leurs effets attendus, des effets non prévus : augmentation de la létalité, diminution du rendement,

17. SLAMA Rémy, « Causes et conditions extérieures des maladies et de la santé », Leçon inaugurale du Collège de France, 31 mars 2022. URL : <https://www.college-de-france.fr/fr/agenda/lecon-inaugurale/causes-et-conditions-exterieures-des-maladies-et-de-la-sante-0>. Consulté le 30 novembre 2023.

18. Acronyme de *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*, faisant référence à une technique de manipulation de l'ADN réalisée avec la nucléase Cas9 (pour *CRISPR associated protein 9*).

19. ZHANG F., « Development of CRISPR-Cas Systems for Genome Editing and Beyond », *Quarterly Reviews of Biophysics*, vol. 52, e6, 2019. URL : <https://doi.org/10.1017/S0033583519000052>. Consulté le 30 novembre 2023.

etc. De plus, leurs effets peuvent varier selon les conditions environnementales.

De nombreuses recherches sont encore à mener pour mieux comprendre les causes génétiques, ce qui ne nous empêche pas de commencer à utiliser les outils d'IA pour certaines pathologies et maladies génétiques.

### **Génétique et IA : un exemple avec le traitement du cancer**

Ces dernières années, l'IA a permis une avancée majeure dans le diagnostic de certains cancers. En utilisant cette technologie, des cancers comme ceux du poumon, du sein ou de la prostate peuvent être dépistés de façon précoce. L'IA permet de détecter des tumeurs sur des radios, alors que le cancer est au début de son développement sur les images radio. Elle permet de faire gagner du temps aux radiologues (qui peuvent utiliser ce temps pour effectuer d'autres tâches plus complexes telles que des vérifications) et surtout détecter des tumeurs que l'œil humain a du mal à percevoir.

En décembre 2022, une collaboration entre l'Institut Curie et Ibx Medical Analytics a permis de démontrer la performance, la fiabilité et la mise en application clinique d'un algorithme d'IA capable de diagnostiquer les cancers du sein lors de biopsies mammaires, qui sont des prélèvements de tissus. L'intelligence artificielle, nommée Galen Breast, a été développée dans l'objectif de réduire les erreurs et d'améliorer la qualité du diagnostic. Ces travaux, dont les résultats sont détaillés dans la revue *NPJ Breast Cancer*<sup>20</sup>, font état de la toute première mise en œuvre d'une IA dans le cadre d'une utilisation clinique. Cette IA n'a pas pour vocation de remplacer les médecins. C'est un outil qui fournit des informations qui permettent de détecter l'avancée de différents types de cancer du sein et ainsi d'affiner la précision du diagnostic. « Le système est surtout développé pour être un appui aux pathologistes, pour vérifier qu'ils n'ont pas manqué quelque chose lors de sa lecture, ainsi que pour automatiser le traitement de certains examens chronophages et fastidieux comme le taux de lymphocytes dans la tumeur », explique Suzette Delalogue, oncologue médicale, spécialiste du cancer du sein et directrice du programme de prévention du cancer Interception de l'institut Gustave Roussy<sup>21</sup>.

---

20. SANDBANK Judith *et alii*, « Validation and Real-World Clinical Application of an Artificial Intelligence Algorithm for Breast Cancer Detection in Biopsies », *NPJ Breast Cancer*, vol. 8, article n° 129, 2022. URL : <https://www.nature.com/articles/s41523-022-00496-w.pdf>. Consulté le 30 novembre 2023.

21. Voir la page : <https://www.gustaveroussy.fr/interception>. Consultée le 30 novembre 2023.

Une nouvelle application de l'IA en génétique est en train de voir le jour : la prédiction de l'effet des mutations sur les individus. En septembre, les scientifiques du laboratoire de recherche de Google DeepMind ont publié un modèle d'intelligence artificielle capable de prédire si des mutations génétiques ponctuelles, c'est-à-dire des changements d'une seule lettre de l'ADN, sont susceptibles de déclencher une pathologie<sup>22</sup>. Leur modèle a été évalué et validé en utilisant d'autres bases de données cliniques non incluses dans leurs données d'entraînement. Il montre que sur les 70 millions de mutations observées, environ 30 % pourraient entraîner une maladie. Nous sommes encore loin de pouvoir prédire l'effet de telle ou telle mutation sur tel ou tel organe — ici seul l'effet global sur l'organisme (délétère, bénin ou inconnu) est prédit, mais c'est une première avancée vers de meilleures prédictions. Ce travail pourrait améliorer le diagnostic des maladies génétiques rares et contribuer à la découverte de nouveaux gènes associés à des maladies.

Les systèmes d'IA peuvent également permettre de trouver de nouveaux traitements thérapeutiques pour soigner certaines maladies génétiques et notamment des cancers. L'IA est capable de prendre en compte des milliers de données (interactions physiques entre molécules, voies de signalisation cellulaires, physiologie et régulations hormonales, associations entre certaines mutations et risques de développer certaines maladies, effets secondaires déjà connus de certains médicaments, etc.) et d'en extraire une liste de molécules candidates qui peuvent éventuellement aider à soigner certaines pathologies. Des essais cliniques sont ensuite nécessaires pour tester ces médicaments potentiels.

L'emploi de l'IA permet de réduire le temps et le coût de la phase de recherche exploratoire des meilleures pistes pharmaceutiques. Aujourd'hui, l'IA se révèle donc être un outil intéressant pour soutenir ces recherches et les rendre plus rapides et plus efficaces.

L'IA va indubitablement conduire à une évolution importante des métiers de la santé. Il est nécessaire, de plus en plus rapidement, de former les actifs à ces nouveaux outils tout en évoquant les risques éthiques. Il est également urgent de former le grand public à ces enjeux de connaissances et de soins.

---

22. CHENG Jun *et alii*, « Accurate Proteome-wide Missense Variant Effect Prediction with Alpha-Missense », *Science*, vol. 381, n° 6664, 19 septembre 2023. URL : <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adg7492>. Consulté le 30 novembre 2023.

## Comment armer le grand public ?

L'IA et la génétique sont en train de transformer la société, le travail et aussi tout particulièrement le domaine scientifique, ouvrant la voie à des découvertes sans doute sans précédent. L'IA en science ou en médecine dépend d'algorithmes complexes et de vastes quantités de données, parfois sensibles. Afin d'être à l'abri d'un usage malveillant de l'IA, il est important d'adopter une approche éthique et responsable pour exploiter pleinement le potentiel de cette technologie révolutionnaire, tout en préservant la confidentialité et l'intégrité des informations scientifiques. Il est aussi important de discuter des finalités des technologies, et de les rendre plus transparentes et compréhensibles de façon à mettre en place certains garde-fous.

Trois aspects sont indispensables : la loi, les normes et l'éthique. Au niveau européen, l'*AI Act* (la loi sur l'IA), mise en place par la Commission européenne le 21 avril 2021, votée au Parlement européen en juin 2023 et qui devrait être finalisée en décembre 2023<sup>23</sup>, se concentre sur l'identification des applications qui présentent un risque et nécessitent une réglementation. Trois niveaux différents de risque (inacceptable, haut, modéré) ont été considérés. L'*AI Act* propose donc d'offrir une protection, en imposant « des obligations à certains systèmes d'IA en raison des risques spécifiques qu'ils présentent ». Des normes vont accompagner le déploiement de la loi sur l'IA pour aligner les technologies sur ces obligations<sup>24</sup>. Tout système d'IA est produit par de multiples agents, IA et humains : les données annotées qui servent à l'apprentissage viennent par exemple des humains, et les paramètres d'apprentissage des IA sont décidés par des humains. La régulation doit suivre les progrès rapides des IA et doit pouvoir s'adapter, au fil de l'évolution de la compréhension des risques. Il est également nécessaire de se doter de comités d'éthique du numérique, comme la France l'a fait pour la bioéthique.

Former le grand public à ces enjeux d'innovation mais aussi d'éthique est fondamental. Un obstacle majeur réside dans le fait que les non-scientifiques considèrent souvent la science comme définitive et fournissant une vérité immuable, plutôt que comme un processus de découverte qui s'autocorrige. Il est normal d'avoir

---

23. Ce numéro a été bouclé le 4 décembre 2023 (NDLR).

24. Voir « Artificial Intelligence », Cenelec. URL : <https://www.cenelec.eu/areas-of-work/cenelec-topics/artificial-intelligence/>. Consulté le 30 novembre 2023.

des discussions et des débats sur ce que les connaissances scientifiques nous apportent dans telle ou telle situation, et sur ce qu'il est préférable de faire. Il est important de prendre en compte une approche pluridisciplinaire et de considérer les différents aspects de la question. Quelles sont les implications qui découlent de cette observation ? Quelles sont les questions sociales et comportementales pertinentes ? Souvent, ceux qui attisent la méfiance à l'égard de la science se focalisent sur certains aspects et en oublient d'autres, ce qui peut conduire à la subversion des preuves. La question du port du masque et celle de la vaccination pendant la pandémie de Covid-19 en sont des exemples frappants. La science n'est pas seulement constituée de faits bruts et de données, ce sont aussi des modes de pensée et de raisonnement, des façons de voir le monde et de le comprendre, qui peuvent être remis en question quand de nouvelles observations sont faites.

Le rôle de l'École est essentiel pour apprendre à apprendre. À l'école, on peut inciter les enfants au questionnement sur la part de l'inné et de l'acquis, et leur montrer avec divers exemples (les muscles qui grossissent en allant à la salle de sport, le volume et la physiologie d'une tique qui sont totalement modifiés après un repas de sang, etc.) que la génétique n'explique pas tout et que l'environnement est un facteur important à prendre en compte dans l'origine des différences entre individus. De même, il est important de dépasser la tentation de plagiat facilitée par l'arrivée d'outils comme ChatGPT, en les invitant à comprendre ces objets et à réfléchir aux usages de l'IA plutôt qu'à être de simples consommateurs<sup>25</sup>. Il ne s'agit pas de dire que l'IA est un bien ou un mal, mais de se demander si elle peut avoir des incidences négatives et d'étudier les risques, et en même temps d'en comprendre le pouvoir d'innovation.

L'Union européenne a beaucoup à gagner en élaborant un cadre pour l'utilisation de l'IA et de la génétique qui soit associée à la confiance et au respect des droits humains et de l'état de droit. Au-delà même de l'Europe, il faudrait imaginer un équivalent du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) pour l'IA : un outil de régulation et de coopération à l'échelle mondiale. ■

---

25. Voir l'exemple des « capsules Éthique du numérique pour les enfants », Fondation Blaise Pascal. URL : <https://www.fondation-blaise-pascal.org/nos-actions/les-projets-de-la-fondation/capsules-ethique-du-numerique-pour-les-enfants/>. Consulté le 30 novembre 2023.

# L'énigme Oppenheimer

Par Jean-Pierre Dupuy <sup>1</sup>

Trois événements concernant l'arme nucléaire ont marqué ces derniers mois. Le premier concerne le Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires (TNP) conclu en 1968, entré en vigueur le 5 mars 1970 et ratifié alors par un grand nombre de pays qui, « considérant la dévastation qui serait infligée à l'humanité tout entière par une guerre nucléaire », s'accordaient pour « empêcher que l'énergie nucléaire ne soit détournée de ses utilisations pacifiques vers des armes nucléaires », éviter que l'arme nucléaire ne se répande dans le monde, et favoriser la réalisation de « l'objectif du désarmement nucléaire » et du maintien de la paix. Mais après l'invasion de l'Ukraine et son entrée dans un conflit durable, et après avoir plusieurs fois menacé l'Alliance atlantique de recourir à l'arme atomique, la Russie a décidé de sortir du TNP... Le deuxième événement est la sortie du film *Oppenheimer* de Christopher Nolan, en juillet 2023, qui, en France, a connu un immense succès comme en témoigne le nombre d'entrées (qui avait dépassé les quatre millions en novembre selon *Box Office France*). Le troisième est la sortie d'une édition poche, mise à jour et augmentée, du livre de Jean-Pierre Dupuy, *La Guerre qui ne peut pas avoir lieu. Essai de métaphysique nucléaire* (Paris : Seuil, octobre 2022), qui estime que « nous sommes plus près d'une guerre nucléaire que nous ne l'avons jamais été ». Son auteur nous livre ici son point de vue sur le film de Christopher Nolan, relativisant la façon dont y est présenté le physicien Robert Oppenheimer (1904-1967), directeur du projet Manhattan qui aboutit à la mise au point de la bombe atomique. H.J.

*Oppenheimer*, le film de Christopher Nolan, est un chef-d'œuvre d'intelligence et de beauté, et il a l'insigne mérite de mettre à la portée du grand public éclairé certaines des

questions les plus difficiles que pose, aujourd'hui plus que jamais, l'invention de l'arme atomique. Mais, par un contre-coup paradoxal de la force esthétique et émotionnelle du film, J. Robert

1. Philosophe, professeur émérite à l'École polytechnique et professeur à l'université de Stanford (Californie) ; auteur d'une quarantaine de livres traduits en 13 langues, il vient d'achever un essai sur la vie et l'œuvre de l'écrivain argentin Jorge Luis Borges (à paraître en 2024).

Oppenheimer est devenu comme un héros magnifique, confondu qu'il est, surtout chez les jeunes, avec l'acteur irlandais Cillian Murphy, merveilleusement bien dirigé par Christopher Nolan. Le film, en vérité, pose une question dérangeante : quel genre de personne fallait-il pour présider à la création d'une arme ayant le pouvoir de mettre fin à l'aventure humaine ? Était-il écrit que ce devait être un savant brillant, mais tourmenté, tiraillé entre des allégeances contradictoires, passant d'une arrogance suscitant les haines au statut d'humble victime, martyr admirable sachant souffrir et mourir pour une cause supérieure ?

Je vais me limiter ici à quatre points parmi ceux qui prêtent le plus à controverse. Les titres des sections sont des lieux communs que je me propose de déconstruire.

Je m'appuie sur le film, plus encore sur l'impressionnante biographie de Kai Bird et Martin J. Sherwin qui a servi de base au film <sup>2</sup>, mais aussi sur le *Bulletin of Atomic Scientists* qui a consacré plusieurs numéros spéciaux au sujet <sup>3</sup>. Il va sans dire que je mers aussi de mes propres travaux, synthétisés dans mon livre *La Guerre qui ne peut pas avoir lieu* <sup>4</sup>.



## 1. La bombe US justifiée par la future et hypothétique bombe nazie

Il est indéniable que, dès 1939 au moins, la nécessité de prendre Hitler de vitesse a joué un rôle important dans la décision de mettre sur pied le projet Manhattan. Après tout, c'est un Allemand, Otto Hahn qui, en janvier 1939, flanqué de son assistant Fritz Strassmann, réussit pour la première fois la fission de l'atome d'uranium en le bombardant avec des neutrons, exploit qu'Oppen-

2. BIRD Kai et SHERWIN Martin J., *American Prometheus: The Triumph and Tragedy of J. Robert Oppenheimer*, New York : Alfred A. Knopf, 2005 (traduction française, *Robert Oppenheimer. Triomphe et tragédie d'un génie*, Paris : Le Cherche midi 2023).

3. Voir le site Internet du *Bulletin of Atomic Scientists* : <https://thebulletin.org/magazine/> et notamment le numéro de juillet 2023 titré « Oppenheimer: The Man. The Movie. The Legacy ». URL : <https://thebulletin.org/magazine/2023-07/>. Consulté le 30 novembre 2023.

4. *La Guerre qui ne peut pas avoir lieu. Essai de métaphysique nucléaire*, Paris : Seuil (Points), octobre 2022 — nouvelle édition revue et augmentée, de l'édition originale parue en 2019. La version américaine est plus complète et plus théorique : *The War That Must Not Occur*, Redwood : Stanford University Press, 2023.

heimer accueillit par un « Mais c'est impossible ! »

**Cependant, dès la fin 1942, il n'y avait plus de bombe nazie à l'horizon.** Pourtant dirigé par l'éminent physicien Werner Heisenberg, le projet allemand avait dès le départ été mis sur de mauvais rails, et il était plus apte à construire une pile atomique capable de dégager de l'énergie qu'une bombe destinée à exploser et à détruire des nations. Il y aurait beaucoup à dire sur cet échec, mais je laisse cette question de côté. Après tout, beaucoup de savants parmi les plus éminents d'Europe centrale, étant juifs, avaient fui pour rejoindre l'Amérique et certains, parmi les plus grands, le projet Manhattan ! L'aveu tardif de Heisenberg selon lequel il n'aurait jamais eu l'intention de fabriquer la Bombe n'a jamais convaincu grand monde <sup>5</sup>.

Cela, les Américains avaient plus d'une raison de le suspecter, en particulier grâce à l'espionnage, mais aussi quand Niels Bohr, l'un des fondateurs de la physique quantique qui avait, avant la guerre, collaboré avec Heisenberg, fuyant le Danemark, rejoignit fin 1943 Oppenheimer à Los Alamos.

Supposons qu'Oppenheimer ait été ce martyr de la conscience

morale que la légende décrit, il aurait fait face à un défi éthique considérable : pourquoi continuer à concevoir et à fabriquer la bombe atomique alors que la bombe allemande semblait compromise ? Les militaires avaient certainement une réponse à cette question, en pensant par exemple comme cibles possibles à l'Union soviétique, pourtant l'alliée des États-Unis, ou au Japon, qui avait commis le crime de Pearl Harbor en décembre 1941. Mais *quid* d'Oppenheimer et de ses fameuses doutes ? Cette question pourtant essentielle, tant le film que la biographie l'abordent à peine, sauf pour évoquer le point suivant.

## 2. La puissance inouïe de la Bombe fera qu'il n'y aura plus jamais de guerre

Cette croyance serait la justification qu'Oppenheimer avait en tête, ou en tout cas exprimait auprès de ses proches, pour continuer à tout faire pour réussir à fabriquer la Bombe. Je soutiens que cette croyance 1) est distincte de la croyance en l'efficacité de la dissuasion, contrairement à ce que beaucoup pensent ; et 2) qu'elle est une croyance fautive et même absurde.

---

5. Voir BERNSTEIN Jeremy (sous la dir. de), *Hitler's Uranium Club: The Secret Recordings at Farm Hall*, New York : Springer-Verlag, 2000.

[NDLR : les auteurs ayant contribué à cet ouvrage sont anglo-saxons ; ils semblent ignorer que Frédéric Joliot-Curie et certains de ses collaborateurs avaient déposé, en mai 1939, des brevets au nom du Conseil national de la recherche scientifique (CNRS) sur un réacteur nucléaire (une « chaudière ») et sur un « explosif » nucléaire, brevets restés secrets à l'époque. Notre collègue Pierre Papon, directeur général du CNRS de 1982 à 1986, a pu les consulter et estime que l'Angleterre et la France, dès 1939, avaient l'intention de travailler sur la bombe atomique. Un élève de Joliot-Curie, Bertrand Goldschmidt, est d'ailleurs parti au Canada où il fut associé au projet Manhattan et informa le général de Gaulle à Ottawa, en 1944, de ses objectifs.]

La dissuasion, c'est tout autre chose. C'est une politique, et non pas un simple état de fait (la Bombe est extrêmement dangereuse) qui prend la forme d'un acte de langage, plus ou moins explicite, du type : si tu franchis une ligne (que, dans le cas français, je laisse indéterminée) qui t'amène à menacer mes « intérêts vitaux », alors je mettrai en œuvre des représailles « incommensurables » qui pourront nous mener, toi et moi, à une montée aux extrêmes jusqu'à l'anéantissement mutuel. Plusieurs conditions doivent être satisfaites, la plus importante étant que la première frappe que tu m'infliges ne m'anéantira pas : je conserverai une capacité de seconde frappe. La dissuasion, c'est une menace de représailles démesurées.

La plupart des théoriciens de la dissuasion considèrent que celle-ci est **par principe** inefficace, puisqu'elle présuppose que si tu passes outre à ma menace, je la mettrai à exécution, provoquant par-là même mon anéantissement non moins que le tien. Ma menace n'est pas crédible.

L'idée géniale et folle qui est venue à la rescousse de la dissuasion a consisté à dire : la meilleure manière de montrer à l'autre qu'on ne va pas l'attaquer en premier — car telle est la peur taraudante qui est le moteur de la dissuasion —, **c'est de lui mon-**

**trer qu'on ne se défend pas**, par exemple au moyen d'un bouclier fait de missiles antimissiles (la fameuse « guerre des étoiles »). Car si je l'attaquais en premier, l'autre conservant par construction une capacité de seconde frappe, la mettrait en œuvre et m'anéantirait aisément puisque je ne me défends pas. Cette idée s'est incarnée dans un traité d'importance considérable, le traité dit ABM (pour *Anti-Ballistic Missile*), signé en 1972 à Moscou par Nixon et Brejnev. Il a gouverné les relations entre les deux superpuissances nucléaires jusque dans les années 2000, quand les États-Unis se sont mis à travailler sérieusement — mais jusqu'ici, et sans doute pour toujours, en vain — à la construction de tels boucliers.

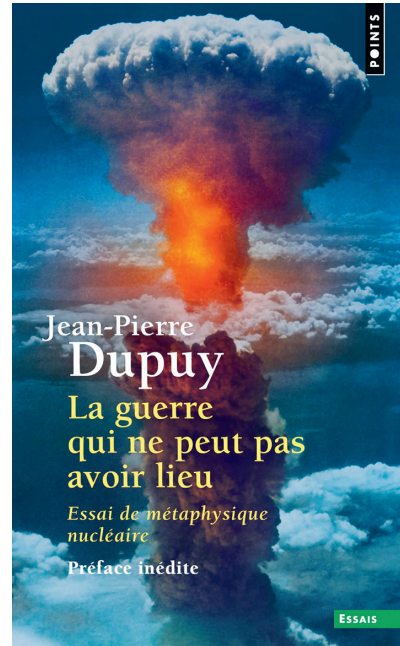
Renoncer à la défense, c'était un peu trop fort pour les états-majors, formés à l'idée principale que la légitimité de la force militaire repose sur la défense d'une nation. On doit admettre avec Daniel Ellsberg <sup>6</sup> que, pour ce qui est de l'Amérique en tout cas, la politique nucléaire a souvent sacrifié la dissuasion à la « préemption », c'est-à-dire la frappe en premier sous le prétexte de répondre à une agression qui n'a pas encore eu lieu — la logique de « *striking second first* ».

Je pose la question suivante. Si la dissuasion se ramenait à affirmer que la puissance de destruction

6. Le génial Daniel Ellsberg — connu surtout aux États-Unis et dans le reste du monde pour avoir divulgué les *Pentagon Papers*, provoquant ainsi, avec le Watergate, la chute de Nixon — était en fait un « planificateur de guerre nucléaire », rattaché à Robert McNamara au Pentagone. Il est mort récemment (en juin 2023), mais la lecture de son dernier livre est indispensable à qui veut réfléchir aux questions que j'évoque ici : *The Domsday Machine: Confessions of a Nuclear War Planner*, New York : Bloomsbury, 2017.

démessurée de la Bombe est à elle seule telle qu'aucun décideur, sauf folie, ne peut songer à la faire exploser sur des populations civiles, comment expliquer que les hyperpuissances nucléaires aient songé à mettre en œuvre une politique de dissuasion infiniment coûteuse et risquée comme on vient de le voir ? En d'autres termes, si la Bombe par sa seule existence assure la paix — lire, la « paix nucléaire » —, comment expliquer que les hyperpuissances nucléaires aient été si violemment en proie à la peur d'être victimes d'une première frappe qu'elles en ont été réduites à recourir à des politiques qui flirtent avec la folie ? Cela ne tient pas. La croyance attribuée à Oppenheimer est non fondée — ce qui ne veut évidemment pas dire qu'il ne l'avait pas.

L'Histoire, bien sûr, a tranché. L'existence de l'arme nucléaire n'a absolument pas empêché les guerres dites conventionnelles : cf. la guerre actuelle en Ukraine. Certes, il n'y a pas eu de guerre nucléaire. Mais je demande que l'on considère le caractère baroque de l'affirmation : c'est grâce à l'invention de l'arme nucléaire qu'il n'y a pas eu de guerre nucléaire. Certes, une fois la bombe atomique inventée, et la prolifération qu'Oppenheimer craignait tant devenue une donnée du monde actuel, les choses sont différentes : il se pourrait que la bombe atomique soit le meilleur rempart contre la bombe atomique. Il me faut une bonne moitié de mon livre pour démontrer que c'est une légende. Je n'insiste pas ici.



### 3. Oppenheimer miné par le doute moral

« Oppie », comme l'appelaient ses amis, fut-il un personnage tragique, déchiré entre la fierté du devoir accompli et la conscience qu'il avait ouvert l'urne de Pandora et qu'il fallait tout faire pour empêcher une fuite en avant vers des armements de plus en plus destructeurs, ou bien fut-il ce « crybaby », cette mauviette, que le président Truman congédia avec si peu d'égards ?

Oppenheimer fut un important théoricien de la physique, sans jamais réussir à décrocher le prix Nobel cependant, mais il a peu apporté à la réflexion sur les doctrines nucléaires. Si on peut néanmoins lui en attribuer une, elle repose sur la distinction nette entre armements stratégiques

et tactiques. Les premiers n'ont qu'un but : dissuader l'ennemi, à l'époque l'Union soviétique, d'attaquer en premier. Augmenter leur nombre, comme le proposait Truman, n'aurait aucun effet sur la dissuasion. En revanche, Oppenheimer croyait que multiplier les armements nucléaires tactiques était nécessaire pour l'emporter sur les Soviétiques. Nous étions en 1950, au moment de la guerre de Corée. Je rappelle que les armements tactiques sont définis, moins par la portée petite et moyenne des missiles et la « faible » puissance explosive de la bombe qu'ils transportent <sup>7</sup>, que par leur destination : ce sont des armes qu'on utilise sur le champ de bataille au même titre que les armes dites « conventionnelles ».

Je cite l'avant-propos de mon livre : « La puissance inouïe de la bombe atomique n'est-elle pas une raison suffisante pour dissuader quiconque de même songer à l'utiliser ? Le principe de dissuasion n'est-il pas inscrit dans sa démesure même ? Qui pourrait avoir intérêt à déclencher une escalade dont tous sortiraient vaincus ? Ces idées ont toujours été présentes depuis 1945 et elles conservent une puissance de conviction indéniable. Comme nous le verrons, on a cherché à réduire tant la puissance des armes que la portée des missiles qui les acheminent dans l'espoir

de rapprocher les dévastations produites par un conflit nucléaire de celles dont une guerre traditionnelle est capable, avant de comprendre que ce sont au contraire ces armes et ces missiles, que l'on dit « tactiques », qu'il faut bannir. Leur faible puissance toute relative incite en effet à les employer sur le champ de bataille, comme on le ferait avec un armement classique, ce qui revient à mettre le pied dans l'engrenage nucléaire dont nous montrerons, par un raisonnement *a priori*, qu'il a vocation à monter aux extrêmes, c'est-à-dire à l'anéantissement mutuel. De même que l'explosion d'une bombe A est le moyen d'amorcer le processus thermonucléaire au cœur d'une bombe à hydrogène, de même l'emploi d'armes nucléaires tactiques sur le champ de bataille est le plus sûr chemin pour faire sortir de leurs silos les missiles balistiques intercontinentaux, alors qu'ils étaient censés par leur seule existence passive assurer la paix nucléaire <sup>8</sup>. »

Les efforts vains d'Oppenheimer pour faire rentrer dans la lampe le méchant génie qu'il avait eu l'imprudence de faire sortir ? Les doutes qu'il exprima à plusieurs reprises et qu'il paya par l'humiliation de se voir retirer son accréditation ? Qu'on me permette d'exprimer moi-même des doutes au sujet de cette trop belle légende <sup>9</sup> !

---

7. Aujourd'hui, plus de 10 fois Hiroshima cependant.

8. *La Guerre qui ne peut pas avoir lieu, op. cit.*, p. 15-16.

9. Oppenheimer alla même jusqu'à préconiser la préemption.

#### 4. Oppenheimer châtié à cause du maccarthysme

Je vois deux raisons principales au désaveu d'Oppenheimer et à l'humiliation qui lui fut infligée en 1954. La première est celle que le pseudo-procès dirigé par l'impitoyable procureur Roger Robb, qui était en service commandé, mit en avant : l'opposition d'Oppenheimer au développement de la bombe H, défendue au contraire par Edward Teller et Ernest Lawrence, lesquels éreintèrent Oppenheimer dans leurs dépositions. La seconde, ce sont les inimitiés très fortes qu'Oppenheimer avait suscitées chez beaucoup, par les humiliations qu'il avait lui-même fait subir à de nombreux collègues qu'il méprisait sans chercher à cacher ce mépris. Le film et la biographie insistent sur le cas de Lewis Strauss, qui devint le président de la Commission de l'énergie atomique des États-Unis (AEC / Atomic Energy Commission), mais il y en a beaucoup d'autres.

Le maccarthysme ? La preuve que ce courant n'a pas joué un rôle majeur, c'est qu'en 1947, la question du renouvellement de la *clearance* (l'accréditation)

d'Oppenheimer s'était déjà posée et la réponse avait été positive. Pourtant, le patron de l'AEC à l'époque, David Lilienthal, avait émis de sérieuses réserves en invoquant les relations d'Oppenheimer avec des membres, actuels ou anciens, du parti communiste (sa maîtresse Jean Tatlock, sa femme Kitty, son frère Frank et la femme de celui-ci, etc.), mais son prestige encore important et l'inexistence de preuves qu'il avait été lui-même encarté firent qu'il obtint sa *clearance* sans problème. Le maccarthysme existait depuis 1946, bien avant que le sénateur qui lui donna son nom apparaisse sur la scène publique. Or, en 1954, il n'y avait aucun fait nouveau concernant les relations communistes passées d'Oppenheimer.

J'ajoute qu'Oppenheimer, qui était accusé d'intelligence avec l'ennemi soviétique par le patron du FBI (Federal Bureau of Intelligence), Edgar Hoover, et son sbire Lewis Strauss, fut lavé de ce soupçon par l'AEC. Il fut déclaré « citoyen loyal » mais incapable d'avoir un rôle dans l'établissement de la politique nucléaire américaine — ce qui était déjà assez humiliant pour que notre héros ne s'en remette jamais. ■

# 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

- ▶ Dossier « Europe : quel rapatriement des chaînes de valeur ? » | n° 457
- ▶ « L'Union européenne face à son étiolement démographique », d'Alain Parant | n° 457
- ▶ « Nouvelle donne pour la gestion de crise », de Patrick Lagadec | n° 457
- ▶ « Le rapport des Français au travail », de Jennifer Clerté et Marc Malenfer | n° 456
- ▶ « L'évolution des valeurs en Europe », de Pierre Bréchon | n° 456
- ▶ « Les réseaux sociaux, 20 ans plus tard », de Caroline Faillet | n° 456
- ▶ « Garder le cap de la transition énergie-climat », de Patrick Criqui et Emmanuel Hache | n° 455
- ▶ « Le défi de l'économie circulaire. Pour une nouvelle approche », de François Grosse | n° 455
- ▶ « La modernisation à la chinoise. Entre stratégie nationale et projet global », de Benoît Vermander | n° 455

### EXCLUSIF

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](mailto:diffusion@futuribles.com)  
Site Internet : <https://boutique.futuribles.com/>

# Dynamique des publications scientifiques : le cas de la France

Par Agéonor Lahatte <sup>1</sup> et Frédérique Sachwald <sup>2</sup>

---

*Alors que les attentes à l'égard de l'innovation vont croissant dans le contexte des transitions numérique et écologique, et que le regain de tensions à l'échelle internationale ravive la concurrence en matière de recherche, où en est la France ? Forte de son héritage et longtemps placée sur le devant de la scène scientifique mondiale, sa production de connaissances apparaît désormais moins dynamique dans un contexte international très exigeant. Au niveau national, les chercheurs expriment des difficultés, que ce soit du fait d'un manque de moyens ou face aux complexités du système de recherche.*

*Agéonor Lahatte et Frédérique Sachwald, s'appuyant sur les tout derniers chiffres de l'Observatoire des sciences et techniques (OST), proposent un coup de projecteur sur la dynamique comparée des publications scientifiques du pays depuis 2010. Après avoir rappelé comment sont effectuées ces comparaisons internationales, ils analysent différents indicateurs au niveau agrégé et par discipline.*

*Si les chiffres globaux ne sont pas alarmants en soi (avec des publications en croissance), la dynamique observée mérite attention. Le pays apparaît modérément engagé dans des domaines en forte croissance à l'échelle mondiale (comme l'informatique dont l'intelligence artificielle) ou les plus importants en nombre de publications (chimie). Symétriquement, son engagement reste marqué dans des disciplines relativement peu dynamiques (physique, mathématiques, sciences humaines). Ces évolutions combinées pourraient se traduire par un éloignement de domaines stratégiques. Les tendances observées dans cet article devront être précisées par des analyses complémentaires, mais elles permettent déjà de mieux appréhender la trajectoire du système de recherche de la France et de contribuer aux réflexions sur son évolution. S.D.*

---

1. Responsable de la base de publications de l'Observatoire des sciences et techniques (OST) / Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (Hcéres).

2. Directrice de l'OST (Hcéres).

L'observation de l'évolution des publications scientifiques mondiales depuis 2010 permet de souligner la dynamique des différentes disciplines. Dans ce contexte mondial, les publications françaises présentent des caractéristiques spécifiques. Cet article analyse la position scientifique de la France à travers une caractérisation de ses publications en comparaison avec celles des principaux pays publiant dans le monde. L'analyse du profil disciplinaire et de l'impact des publications françaises permet d'aborder la question du rôle de la structure disciplinaire des publications françaises dans

## E1. SOURCES DE DONNÉES D'ANALYSE DES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES MONDIALES

La base de publications de l'OST est une version locale du *Web of Science* (WoS) de Clarivate Analytics. Cette base bibliométrique internationale indexe plus de 21 000 revues scientifiques et des milliers d'actes de conférence répondant à un ensemble de critères de qualité éditoriale, comme la mise en œuvre d'un processus d'évaluation par les pairs, et d'impact scientifique. Le WoS couvre mieux les disciplines internationalisées et relativement moins bien les disciplines les plus appliquées ou constituées de publications à diffusion principalement nationale — certains domaines des sciences humaines et sociales (SHS) et des sciences pour l'ingénieur notamment. La base de l'OST comporte différents index de revues et d'actes de conférence du WoS, y compris l'*Emerging Sources Citation Index* (ESCI) qui comporte une part plus grande de supports des disciplines SHS ou non anglophones.

L'OST explore la pertinence de sa base de publications pour analyser la position mondiale des pays ou d'institutions de recherche<sup>1</sup>. La bonne couverture des conférences en informatique a ainsi été vérifiée à partir des listes du CORE (Computing Research and Education Association of Australasia). Concernant les langues de publication, une exploration a comparé la base de l'OST avec la base OpenAlex<sup>2</sup> qui est beaucoup plus large. Pour les articles de revues et d'actes de conférence publiés entre 2017 et 2022, la part de l'anglais est de 97 % dans le WoS et 78 % dans OpenAlex, en augmentation par rapport à 2000. Avec 2,5 % dans OpenAlex, la part du français est très supérieure à ce qu'elle est dans le WoS, mais l'écart est aussi très net pour d'autres langues, comme l'allemand, le portugais ou l'italien. Dans les deux bases, la deuxième langue de publication est l'espagnol,

1. Voir *Analysis of the Scientific and Technological Profile of the CNRS [Centre national de la recherche scientifique]: European Projects, Publications and Patents*, Paris : Hcéres, novembre 2023. URL : <https://bit.ly/2023-analysis-scientific-technological-profile-CNRS>. Consulté le 28 novembre 2023. Le document aborde cette question, notamment avec une analyse à partir de l'archive nationale HAL (Hyper-articles en ligne).

2. Voir la description et les différentes conditions d'accès sur le site Internet <https://openalex.org/>

alors que le chinois apparaît peu présent. Par ailleurs, les chercheurs des pays non anglophones tendent à majoritairement publier en anglais. Pour la France, la part des notices d'articles en anglais dans l'archive nationale HAL est de 78 % en 2022, contre 71 % en 2015<sup>3</sup>. L'impact de la part des langues de publication sur la part des publications des pays pourrait surtout concerner certains pays émergents, mais reste à analyser à partir de bases de publications de qualité équivalente concernant les métadonnées pertinentes.

Pour chaque publication, la base de l'OST contient des informations

sur le support, les auteurs et leurs affiliations, les contenus scientifiques (titre, mots-clés, résumé...), les sources de financement et des liens avec d'autres publications (références bibliographiques, citations). Les publications sont associées à des nomenclatures géographiques via les adresses d'affiliation des auteurs et des nomenclatures disciplinaires liées aux revues. L'affectation disciplinaire de chaque publication est précisée par l'OST de manière à ce que sa catégorie corresponde à la catégorie majoritaire de ses références bibliographiques. ■

A.L. et F.S.

3. Source : HAL. URL : <https://hal.science/>. Extraction du 12 avril 2023 ; base dédoublonnée sur l'identifiant « doc id » et filtre sur le type « art ».

les évolutions observées. La conclusion suggère des pistes d'analyse complémentaires pour expliquer la trajectoire de la France.

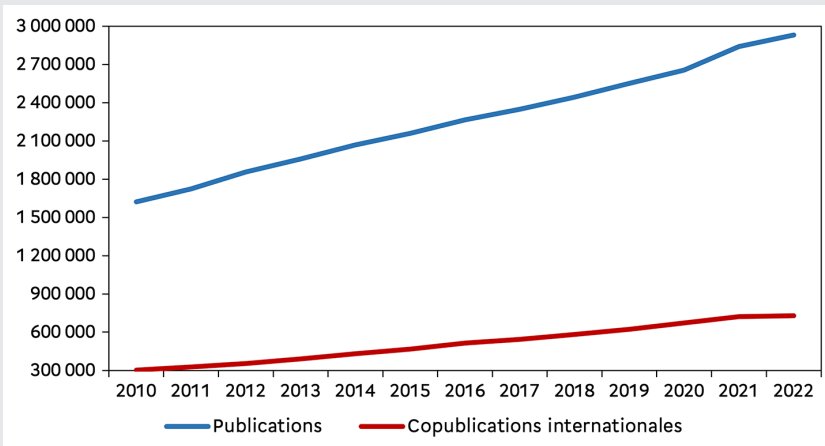
## Évolution des publications scientifiques dans le monde depuis 2010

Depuis 2010, les publications scientifiques mondiales poursuivent leur augmentation historique et en 2022, le total est de l'ordre de trois millions (graphique 1). La part de copublications internationales tend à augmenter dans la plupart des pays, ce qui contribue à la croissance du nombre de publications à l'échelle mondiale. Depuis 2010, les publications mondiales ont augmenté de plus de 80 %, mais les copublications internationales ont plus que doublé et représentent 25 % du total.

Les parts de copublications internationales restent cependant variables<sup>3</sup>. Les grands pays ont une part de copublications inter-

3. Voir « La position scientifique de la France dans le monde à travers ses publications », dans *État de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation*, n° 16, 2023, ministère français de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (MESR). URL : [https://publication.enseignementsup-recherche.gouv.fr/eestr/FR/EESR16\\_R\\_29/la\\_position\\_scientifique\\_de\\_la\\_france\\_dans\\_le\\_monde\\_a\\_travers\\_ses\\_publications/](https://publication.enseignementsup-recherche.gouv.fr/eestr/FR/EESR16_R_29/la_position_scientifique_de_la_france_dans_le_monde_a_travers_ses_publications/). Consulté le 28 novembre 2023.

Graphique 1. Nombre de publications mondiales et de copublications internationales, 2010-2022



N.B. : données 2022 complètes à 95 %.

Source : base OST, Web of Science (WoS), calculs OST-Hcéres.

nationales moindre ; celle des États-Unis (43 %) est ainsi beaucoup plus faible que celle des Pays-Bas (69 %). Au début des années 2020, la part de copublication avec au moins une institution à l'étranger est de 65 % pour la France, 68 % pour le Royaume-Uni et 59 % pour l'Allemagne. La part des copublications internationales des pays asiatiques est plus faible, entre 25 % et 36 % pour la Chine, l'Inde, la Corée du Sud et le Japon ; symétriquement celle des copublications nationales y est plus élevée (55 % pour la Chine). Au total, les copublications, internationales et nationales, représentent de 85 % à 90 % du total des publications pour les pays européens, de l'ordre de 80 % pour les États-Unis, la Chine ou le Japon.

La recherche médicale est de loin la première grande discipline de publication scientifique dans le monde, avec 27 % du total mondial. La pandémie de Covid a suscité de nombreuses publications en 2020 et 2021, ce qui a renforcé la part de la recherche médicale en 2020-2021, comme le souligne le graphique 2 (*infra*). En 2010, la biologie fondamentale était la deuxième discipline publiant le plus ; son nombre de publications a augmenté de plus d'un tiers, mais sa part a baissé de 20 %. La part de la biologie fondamentale a successivement été dépassée par les sciences pour l'ingénieur en 2012, la chimie en 2017 et les sciences sociales en 2022. Le nombre de publications en sciences sociales a été multiplié par plus de deux depuis 2010 et leur part approche 10 % en 2022, en faisant la quatrième discipline publiant le plus dans le monde.

## E2. COMPTEZ LES PUBLICATIONS POUR COMPARER ENTRE DISCIPLINES OU ENTRE PAYS

Les publications résultent souvent de contributions de nombreux auteurs affiliés à différentes institutions. De plus, le nombre de signataires tend à varier selon les disciplines scientifiques. En conséquence, pour comparer les institutions et les pays d'implantation, il convient de décomposer les contributions aux publications plutôt que la simple participation. Pour ce faire, le compte fractionnaire attribue une fraction de publication à chaque signataire : pour une publication signée par des auteurs affiliés à trois universités, une en Allemagne, une en Italie et une en France, la France se verra attribuer un tiers de publication. Le cas d'un article cosigné par plusieurs institutions d'un pays suit la même logique : par exemple deux auteurs de deux universités en France et un en Allemagne génèrent deux tiers de la publication pour la France.

Dans le cas fréquent de publications françaises issues d'une unité mixte de recherche (UMR) associant un organisme et une université, le corpus consolidé de la France ne comporte

pas de doublons et ne compte cette affiliation qu'une fois pour la France — même si chacune des institutions cotutelles de l'UMR peut, individuellement, identifier cette publication comme lui appartenant<sup>1</sup>.

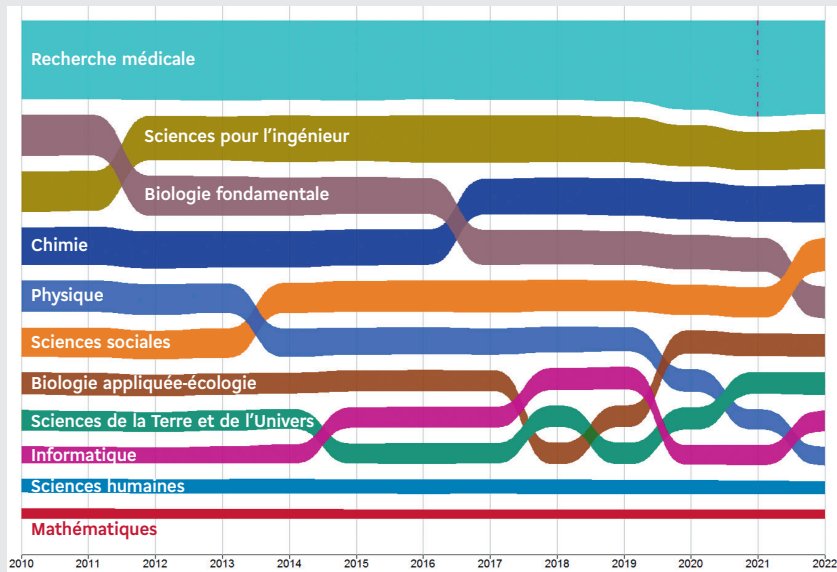
Il est important d'utiliser le compte fractionnaire d'une part pour pouvoir calculer des parts mondiales et européennes de publications, et d'autre part pour souligner les variations disciplinaires dans la propension à copublier, y compris avec des partenaires étrangers. À l'inverse, le compte entier attribue entièrement une publication à un pays dès que l'une des adresses d'affiliation le mentionne ; une même publication peut être comptabilisée pour plusieurs pays, ce qui génère des doublons (le compte entier n'est pas sommable). En conséquence, les pays qui ont une part élevée de copublications internationales ont sensiblement plus de publications en compte entier. Dans cet article, les comparaisons entre pays et entre disciplines utilisent le compte fractionnaire. ■

A.L. et F.S.

1. Des précisions sont fournies dans le cas du CNRS (Centre national de la recherche scientifique), par exemple — voir *Analysis of the Scientific and Technological Profile of the CNRS*, op. cit.

La physique est la discipline dont le nombre de publications a crû le moins depuis 2010 ; sa part est passée de la cinquième à la neuvième plus importante. À l'inverse, le nombre de publications en informatique a plus que doublé et la discipline a désormais la huitième part la plus importante, devant la physique. Elle compte un peu moins de publications que les sciences de la Terre et de l'Univers qui ont aussi enregistré une croissance forte. De même, la biologie appliquée-écologie a sensiblement la même part de publications mondiales de 6,6 %.

Graphique 2. Part des disciplines dans le total mondial des publications, 2010-2022 (en %)



N.B. : données 2022 complètes à 95 %.

Source : base OST, WoS, calculs OST-Hcéres.

Les sciences humaines et les mathématiques ont enregistré une croissance plus faible et restent les deux plus petites disciplines par le nombre de publications.

## Évolution de la position de la France dans les publications scientifiques mondiales

Les parts européenne et mondiale de publications scientifiques de la France s'inscrivent à la baisse depuis le début des années 2000 (tableau 1). Cette tendance s'observe à des degrés divers dans d'autres pays à haut revenu et s'explique en partie par le dynamisme relatif de la production scientifique des pays émergents et, au sein de l'Union européenne, de certains pays membres. Parmi les pays à haut revenu, la France est cependant l'un de ceux dont la part mondiale de publications a le plus reculé et en 2022, avec une part de 2,1 % : elle se situe au 13<sup>e</sup> rang avec une part équivalente à celle du Brésil (tableau 1 et graphique 3).

La Chine est devenue le premier pays producteur de publications scientifiques devant les États-Unis et la croissance des publications de l'Inde a aussi été très forte (graphique 3). Différents pays à haut revenu enregistrent une évolution de leur nombre de publications

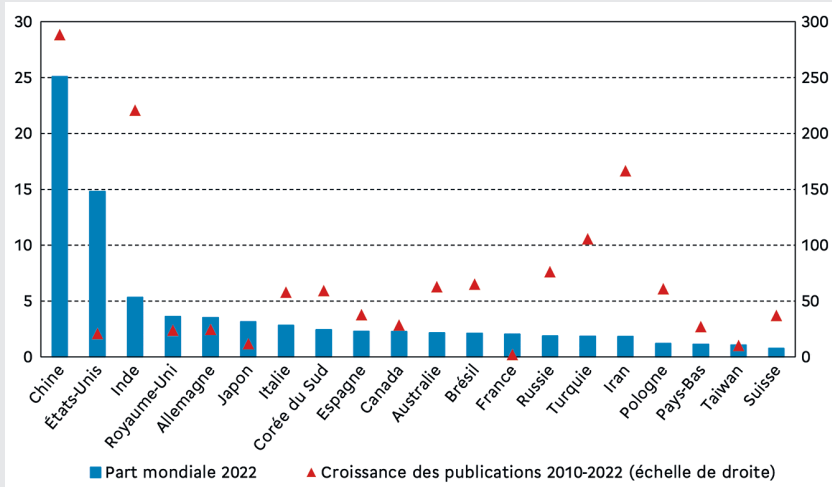
Tableau 1. Part des publications scientifiques de la France toutes disciplines, 2005-2022 (en %)

Part des publications de la France dans le total	2005	2010	2015	2020	2022	Ratio 2022/2005
UE-27	15,4	13,9	12,7	11,2	10,7	0,69
Monde	4,1	3,6	3,0	2,3	2,1	0,51

N.B. : données 2022 complètes à 95 %.

Source : base OST, WoS, calculs OST-Hcéres.

Graphique 3. Part mondiale et taux de croissance des publications des 20 premiers pays publiant, 2010-2022 (en %)



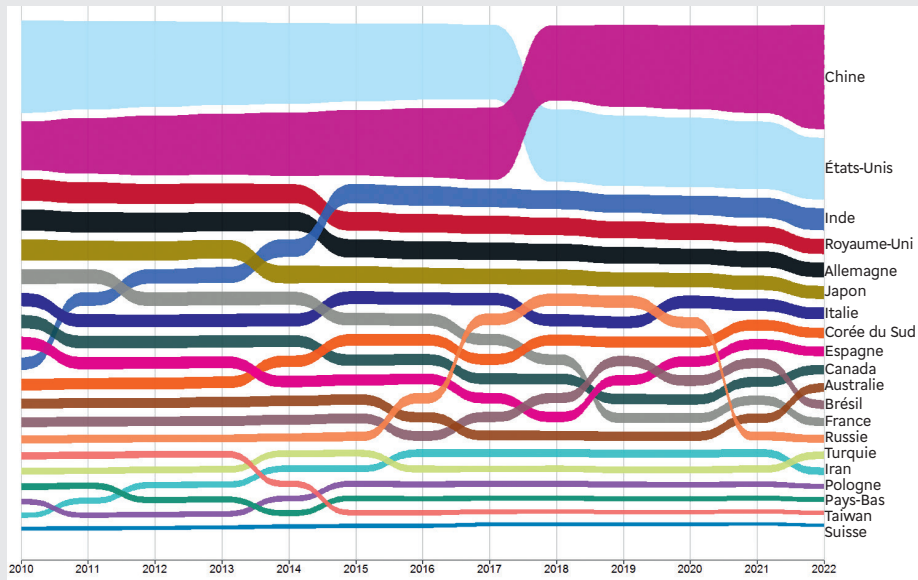
N.B. : données 2022 complètes à 95 %.

Source : base OST, WoS, calculs OST-Hcéres.

plus favorable que la France, notamment l'Australie, le Canada, l'Italie ou encore l'Espagne, comme le souligne le graphique 3. Mais c'est aussi le cas de plus grands pays de publication, tels les États-Unis, le Royaume-Uni et l'Allemagne. Ces deux voisins européens ont une part des publications mondiales respectivement de 3,6 % et 3,5 % en 2022.

Le graphique 4 permet de suivre la dynamique des parts de publications mondiales depuis 2010 pour chacun des 20 premiers pays publiant. Il souligne les évolutions contrastées, au cours de la décennie, de la Russie et dans une moindre mesure de l'Espagne. Les graphiques 3 et 4 suggèrent que le recul de la position de la France est dû à un faible dynamisme, alors même que d'autres pays enregistrent une forte croissance de leurs publications scientifiques.

Graphique 4. Évolution de la part mondiale de publications des 20 premiers pays publiant, 2010-2022 (en %)



N.B. : données 2022 complètes à 95 %.

Source : base OST, WoS, calculs OST-Hcéres.

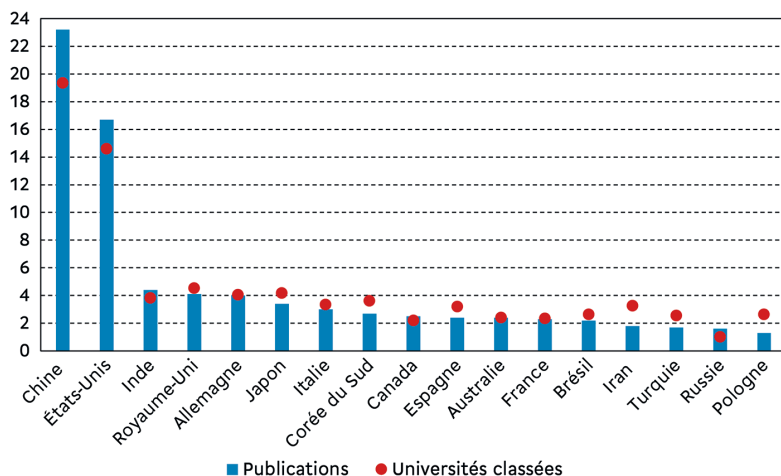
### E3. PART DES PUBLICATIONS MONDIALES ET DES UNIVERSITÉS PUBLIANT LE PLUS DANS LE MONDE

Le classement de Leiden publié en 2023 porte sur 1 411 universités comptant au moins 800 publications en compte fractionnaire entre 2018 et 2021 au sein du corpus mondial élaboré par le CWTS (Centre for Science and Technology Studies de l'université de Leiden). La France compte 33 universités, soit 2,3 % du total. De façon plus générale, le graphique 5 suggère que la part mondiale de publications des pays est corrélée à leur part des universités dans le total du classement.

L'agrégation des universités par pays propose ainsi une perspective

différente de celle qui se concentre sur le rang des premières universités de chaque pays. La position des pays diffère notamment en fonction de la concentration des universités et de la dispersion de leur taille ou de leurs moyens. Ainsi, si la France a plus d'universités que l'Allemagne dans le haut du classement, elle en a sensiblement moins au total (33 contre 57). Par ailleurs, la part des universités françaises a baissé au cours de la dernière décennie, dans une proportion similaire à la baisse de sa part mondiale de publications. On peut noter que la tendance a été similaire pour le classement

Graphique 5. Part des publications mondiales 2021 et des universités du classement de Leiden 2023\* (en %)



\*Parts calculées sur la base actualisée jusqu'en 2021 — contre 2022 pour les graphiques 3 et 4. De plus, le périmètre est un peu moins large, n'incluant pas l'index ESCI (voir encadré E1) —, ce qui explique la part un peu supérieure de la France (2,3 %).

Sources : publications, base OST, WoS, calculs OST-Hcéres et publications des années 2018-2021 ; universités classées par le CWTS. URL : <https://www.leidenranking.com/ranking/2023/list>. Consulté le 28 novembre 2023.

de Shanghai <sup>1</sup>, même si ce dernier a une méthodologie différente et calcule un indicateur composite qui incorpore des facteurs de réputation des universités. Différents autres classements prennent en compte des caractéristiques plus

variées des universités et font appel à des méthodes diverses qui ne permettent pas de comparaison simple avec ces deux classements centrés sur la recherche. ■

A.L. et F.S.

1. « 2023 Academic Ranking of World Universities (ARWU) », Shanghai Ranking, juin 2023. URL : <https://www.shanghairanking.com/rankings/arwu/2023>. Consulté le 28 novembre 2023.

## Profil scientifique comparé de la France

La part de la France est sensiblement plus forte dans certaines disciplines que dans le total de ses publications. C'est particulièrement le cas des mathématiques, où la part mondiale du pays passe de 5,7 % en 2010 à 3,6 % en 2022, soit respectivement 60 % et 70 % au-dessus de sa part toutes disciplines confondues. La France apparaît ainsi très spécialisée en mathématiques ; son indice a même augmenté au cours de la période à 1,7 en 2022 (tableau 2).

Tableau 2. Part mondiale des publications de la France par discipline et indices de spécialisation\*

Disciplines (part mondiale de la France 2022 par ordre décroissant)	Part des publications françaises 2010 (%)	Indice de spécialisation 2010	Part des publications françaises 2020 (%)	Indice de spécialisation 2020	Part des publications françaises 2022 (%)	Indice de spécialisation 2022
Mathématiques	5,7	1,6	3,9	1,7	3,6	1,7
Physique	4,3	1,2	2,8	1,2	2,6	1,2
Biologie fondamentale	3,9	1,1	2,8	1,2	2,5	1,2
Sciences humaines	4,0	1,1	3,0	1,3	2,5	1,2
Sciences de la Terre et de l'Univers	4,4	1,2	2,8	1,2	2,4	1,1
Informatique	4,5	1,3	2,5	1,1	2,1	1,0
<b>Toutes disciplines</b>	<b>3,6</b>	<b>1,0</b>	<b>2,3</b>	<b>1,0</b>	<b>2,1</b>	<b>1,0</b>
Recherche médicale	3,5	1,0	2,3	1,0	2,0	1,0
Sciences pour l'ingénieur	3,5	1,0	2,0	0,9	1,8	0,9
Biologie appliquée-écologie	2,9	0,8	2,0	0,9	1,7	0,8
Chimie	3,5	1,0	2,0	0,9	1,6	0,8
Sciences sociales	2,0	0,6	1,6	0,7	1,5	0,7

\*L'indice de spécialisation est défini dans l'encadré 4 (ci-contre).

N.B. : données 2022 complètes à 95 %.

Source : base OST, WoS, calculs OST-Hcéres.

La France est restée nettement spécialisée en physique depuis 2010 avec un indice de 1,2. Son indice de spécialisation a augmenté en biologie fondamentale et sciences humaines pour atteindre 1,2. Ses indices de spécialisation ont à l'inverse baissé de 0,1 en sciences de la Terre et de l'Univers ainsi qu'en sciences pour l'ingénieur. Ils ont encore plus nettement baissé en informatique (de 1,3 à 1) et en chimie (de 1 à 0,8). La spécialisation de la France en sciences sociales augmente un peu, mais le pays reste non spécialisé, avec un indice de 30 % inférieur à la moyenne mondiale. En recherche médicale, la première discipline à l'échelle mondiale, la France reste engagée au niveau de la moyenne mondiale (indice 1).

L'évolution du profil disciplinaire de la France n'est ainsi pas alignée sur la dynamique mondiale des disciplines. Le pays est le plus spécialisé dans des disciplines qui croissent peu (physique) et sont aussi, dans certains cas, de taille modeste (sciences humaines, mathématiques). À l'inverse, sa part relative de publications est

## E4. MESURE DE LA SPÉCIALISATION PAR DISCIPLINE

La spécialisation scientifique fournit une mesure de la concentration des publications d'un pays ou d'une institution dans une discipline scientifique. L'indice de spécialisation étant un double rapport, il peut être présenté de deux façons. L'indice de spécialisation d'un pays dans une discipline peut ainsi être défini, de manière équivalente, comme :

— le *ratio* de la part mondiale du pays dans cette discipline à sa

part mondiale toutes disciplines confondues ;

— la part de la discipline dans l'ensemble des publications du pays, normalisée par cette même part dans les publications mondiales.

Plus l'indice de spécialisation est supérieur à 1, plus l'acteur est dit « spécialisé » dans la discipline considérée. ■

A.L. et F.S.

faible ou en recul dans des disciplines dynamiques (informatique, sciences sociales) ou de grande taille (sciences pour l'ingénieur, chimie). Cette configuration n'apparaît pas favorable à la position scientifique de la France dans le monde, dont l'analyse dépend évidemment de différents facteurs qui peuvent interagir avec cette question du profil disciplinaire et de sa dynamique.

L'analyse du profil disciplinaire peut être explorée à un niveau plus fin. Le tableau 3 (page suivante) permet d'aborder le cas de l'intelligence artificielle (IA) qui, dans un périmètre restreint, hors applications dans d'autres domaines, est une des composantes majeures de la discipline informatique <sup>4</sup>. En effet, au début de la décennie 2020, les publications en IA représentent plus de 60 % des publications de la discipline informatique <sup>5</sup>.

Le tableau 3 souligne que la part de publications en IA a augmenté depuis 2018, dans le monde comme dans la plupart des premiers pays publiant dans ce domaine. Les exceptions sont le Japon, le Brésil, la Russie et la Pologne. Parmi les premiers pays publiant, la Chine a l'indice de spécialisation le plus élevé, avec une part mondiale de publications en IA qui atteint 40 %. L'Inde, la Corée du Sud

4. Les sous-disciplines de l'informatique dans la nomenclature utilisée sont : théorie et méthodes informatiques, ingénierie logicielle, matériel et architecture informatiques, systèmes d'information, IA, cybernétique, robotique, télécommunications, informatique médicale, informatique / applications interdisciplinaires.

5. Pour une analyse de l'IA selon des périmètres plus ou moins larges, voir « Les publications scientifiques en IA selon trois corpus », dans *État de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation*, op. cit. URL : [https://publication.enseignementsup-recherche.gouv.fr/eesr/FR/EESR16\\_R\\_50/les\\_publications\\_scientifiques\\_en\\_intelligence\\_artificielle\\_selon\\_trois\\_corpus/](https://publication.enseignementsup-recherche.gouv.fr/eesr/FR/EESR16_R_50/les_publications_scientifiques_en_intelligence_artificielle_selon_trois_corpus/). Consulté le 28 novembre 2023.

**Tableau 3. Publications et indice de spécialisation des 20 premiers pays publiant en IA, par ordre décroissant de la part en 2022**

	Part mondiale 2022 (%)	Évolution 2018-2022 (%)	Part de l'IA dans le total des publications		Indice de spécialisation 2022
			2018	2022	
Chine	40,1	109 %	4,8	6,1	1,6
États-Unis	10,1	23 %	2,1	2,6	0,7
Inde	7,5	68 %	4,5	5,3	1,4
Corée du Sud	3,2	112 %	2,6	5,0	1,3
Allemagne	2,9	36 %	2,4	3,1	0,8
Royaume-Uni	2,6	24 %	2,3	2,8	0,7
Japon	2,4	- 3 %	3,0	2,9	0,8
Italie	2,0	54 %	2,0	2,6	0,7
Canada	1,7	46 %	2,1	2,9	0,8
<b>France</b>	<b>1,6</b>	<b>5 %</b>	<b>2,7</b>	<b>3,0</b>	<b>0,8</b>
Australie	1,6	38 %	2,3	2,8	0,7
Espagne	1,5	13 %	2,4	2,5	0,7
Turquie	1,3	44 %	2,7	2,7	0,7
Taiwan	1,3	28 %	4,3	4,6	1,2
Brésil	1,1	- 6 %	2,1	1,9	0,5
Iran	1,0	39 %	1,6	2,0	0,5
Russie	0,8	- 25 %	1,6	1,6	0,4
Pologne	0,8	- 19 %	2,8	2,4	0,6
Pays-Bas	0,6	48 %	1,5	2,1	0,5
<b>UE-27</b>	<b>13,7</b>	<b>20 %</b>	<b>2,4</b>	<b>2,7</b>	<b>0,7</b>
<b>Monde</b>	<b>100</b>	<b>55 %</b>	<b>2,9</b>	<b>3,8</b>	<b>1</b>

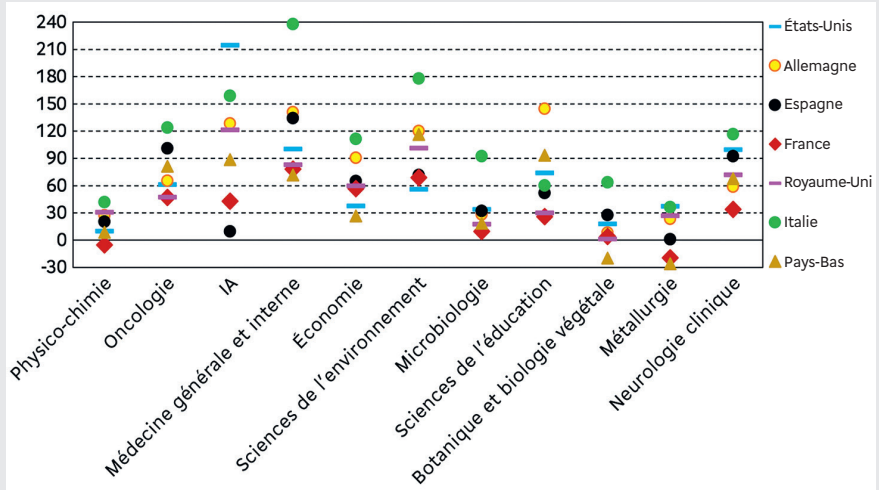
N.B. : données 2022 complètes à 95 %.

Source : base OST, WoS, calculs OST-Hcéres.

et Taiwan sont aussi spécialisés. Les États-Unis sont le deuxième pays publiant le plus en IA sans être spécialisé. C'est aussi le cas des grands pays européens, y compris la France dont la part de l'IA dans les publications est inférieure de 20 % à la moyenne mondiale (indice 0,8). La part de la France dans les publications mondiales en IA a aussi moins progressé que celle d'autres pays européens au cours des dernières années.

Le graphique 6 compare la croissance des publications de quelques pays à haut revenu dans deux types de domaines : ceux dont les

Graphique 6. Croissance des publications des catégories scientifiques les plus dynamiques et / ou publiant le plus\* à l'échelle mondiale, 2010-2022 (sélection de pays)



\*Qui représentent au moins 1,4 % des publications mondiales et / ou ont un taux de croissance supérieur à 100 % entre 2010 et 2022. Il y a au total 254 catégories dans la nomenclature qui s'appuie sur les références des publications pour grouper les articles dans une catégorie.

N.B. : données 2022 complètes à 95 %.

Source : base OST, WoS, calculs OST-Hcéres.

publications ont été très dynamiques comme l'IA, les sciences de l'environnement ou l'oncologie, et ceux qui représentent le plus de publications à l'échelle mondiale, comme la physico-chimie, la métallurgie ou la médecine générale et interne. L'IA, domaine particulièrement dynamique présente des taux de croissance des publications par pays les plus dispersés. Les sciences de l'environnement où les publications ont aussi fortement crû, présentent une dispersion entre pays moins forte, mais tout de même élevée. Concernant l'IA, ce sont les États-Unis qui ont le plus augmenté leurs publications parmi les pays présentés ; concernant les sciences de l'environnement, c'est l'Italie<sup>6</sup>.

À l'inverse, la physico-chimie, qui représente 5,4 % des publications mondiales a un taux de croissance plus faible et une faible dispersion de cette croissance entre pays. La métallurgie est dans

6. L'analyse s'appuie sur une approche disciplinaire pour comparer les pays dans différents domaines. Concernant l'IA et les sciences de l'environnement, une approche thématique large, intégrant les aspects interdisciplinaires de ces domaines, aboutit à des résultats similaires. Voir « Les publications scientifiques en IA selon trois corpus », *ibidem* ; et « La position scientifique et technologique de la France dans la recherche sur l'environnement », dans *État de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation*, n° 15, mai 2022, MESR. URL : [https://publication.enseignementsup-recherche.gouv.fr/eest/FR/EESR15\\_R\\_53/la\\_position\\_scientifique\\_et\\_technologique\\_de\\_la\\_france\\_dans\\_la\\_recherche\\_sur\\_l\\_environnement/](https://publication.enseignementsup-recherche.gouv.fr/eest/FR/EESR15_R_53/la_position_scientifique_et_technologique_de_la_france_dans_la_recherche_sur_l_environnement/). Consulté le 28 novembre 2023.

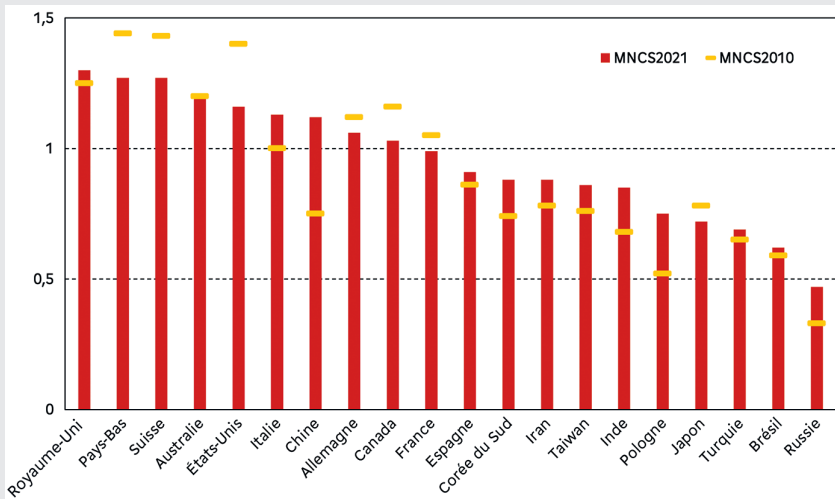
une situation similaire. L'oncologie, l'économie et les sciences de l'éducation ont des taux de croissance élevés, entre 130 % et 190 %, ainsi qu'une dispersion intermédiaire entre pays.

La France figure parmi les deux ou trois pays qui enregistrent les taux de croissance les plus faibles dans tous ces domaines. L'Espagne a le taux le plus faible en IA et les Pays-Bas en économie, botanique et métallurgie.

## Mesure de l'impact scientifique des publications françaises

Le graphique 7 fournit l'indice d'impact normalisé des publications qui permet de comparer des pays dont les profils disciplinaires diffèrent (encadré E5). Pour les publications parues en 2010 comme en 2021, quatre pays ont des indices d'impact supérieurs d'au moins 20 % à la moyenne mondiale : le Royaume-Uni, les Pays-Bas, la Suisse et l'Australie. L'indice d'impact des États-Unis a fléchi au cours de la décennie, mais reste proche de 1,2. Quatre pays ont des indices compris entre la moyenne mondiale et une valeur 15 % supérieure en 2021 : l'Italie, la Chine, l'Allemagne et le Canada. L'indice de la France est passé de près de 1,1 en 2010 à 1,0 en 2021.

Graphique 7. Indice d'impact des publications\* des 20 premiers pays publiant, en 2010 et 2021



\*MNCS : Mean Normalized Citation Score (voir encadré E5, ci-contre).

N.B. : données 2022 complètes à 95 %.

Source : base OST, WoS, calculs OST-Hcéres.

## E5. MESURE DE L'IMPACT SCIENTIFIQUE

Les indicateurs d'impact s'appuient sur les références que font les articles scientifiques à des publications antérieures. Les pratiques de citation étant différentes entre domaines de recherche, une normalisation est nécessaire pour corriger cet effet disciplinaire et pouvoir faire des comparaisons suivant diverses dimensions. L'indicateur doit aussi tenir compte de la durée entre la date de parution et celle des citations. Plus un article est ancien, plus il aura reçu

de citations à la date de l'analyse. L'impact moyen des publications d'un pays est défini par le nombre moyen des citations normalisées de ses publications dans un domaine, (c'est le *Mean Normalized Citation Score / MNCS*). Un indice d'impact de valeur 1 signifie que l'impact moyen des publications dans une discipline est égal à celui de la moyenne des publications mondiales dans la discipline. ■

A.L. et F.S.

L'indice d'impact scientifique des publications françaises toutes disciplines confondues a fléchi au cours de la décennie. Néanmoins, certaines disciplines maintiennent, voire améliorent, leur indice (en vert dans le tableau 4). C'est le cas de la recherche médicale dont l'indice est supérieur de 20 % à la moyenne mondiale. Les

Tableau 4. Indice d'impact\* des publications françaises par discipline, 2010-2021

Disciplines (ordre décroissant 2021)	2010	2015	2020	2021*
Recherche médicale	0,9	1,1	1,1	1,2
Biologie appliquée-écologie	1,3	1,2	1,1	1,1
Sciences de la Terre et de l'Univers	1,2	1,1	1,1	1,1
<b>Toutes disciplines</b>	<b>1,1</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>
Biologie fondamentale	1,0	1,0	1,0	1,0
Physique	1,2	1,1	1,0	1,0
Sciences sociales	0,8	0,8	0,8	0,9
Mathématiques	1,2	1,1	0,9	0,9
Sciences pour l'ingénieur	1,2	1,1	1,0	0,9
Informatique	1,0	0,9	0,8	0,8
Chimie	1,1	1,0	0,8	0,8
Sciences humaines	0,6	0,6	0,6	0,6

\*Les citations des publications de 2021 sont comptabilisées pour les années 2021 et 2022 incomplète.  
Source : base OST, WoS, calculs OST-Hcéres.

**Tableau 5. Domaines de plus forte spécialisation de la France\*, comparaison avec le Royaume-Uni et l'Allemagne, 2021**

Discipline	France			Allemagne			Royaume-Uni		
	Nombre de publications**	Indice de spécialisation	Indice d'impact	Nombre de publications	Indice de spécialisation	Indice d'impact	Nombre de publications	Indice de spécialisation	Indice d'impact
Étude du passé humain (SH6)	641	1,9	0,5	470	0,9	1,2	1 396	2,5	2,1
Sciences de l'Univers (PE9)	841	1,8	1,1	111	1,4	1,2	1 215	1,5	1,2
Mathématiques (PE1)	3 146	1,7	0,9	3 084	1,0	1,0	2 417	0,8	1,1
Cultures et production culturelle (SH5)	1 216	1,6	0,6	1 210	0,9	1,0	2 902	2,2	1,6
Biologie cellulaire (LS3)	822	1,4	1,0	1 458	1,5	1,1	1 215	1,2	1,2
Biologie intégrative : des gènes et génomes aux systèmes (LS2)	1 045	1,3	0,9	1 482	1,2	1,3	1 580	1,2	1,6
Constituants fondamentaux de la matière (PE2)	2 310	1,3	1,1	4 206	1,4	1,2	2 430	0,8	1,3
Physique de la matière condensée (PE3)	1 020	1,3	1,0	1 956	1,5	1,2	832	0,6	1,21
Immunité et infectiologie (LS6)	3 726	1,3	1,0	4 808	1,0	1,1	4 941	1,0	1,5
Biologie environnementale, écologie et évolution (LS8)	1 936	1,2	1,1	2 582	1,0	1,4	2 920	1,1	1,4

\*Domaines correspondant aux 10 sous-panels du Conseil européen de la recherche (codes ERC indiqués dans le tableau) dans lesquels la France est la plus spécialisée (indice au moins égal à 1,1).

\*\*Compte fractionnaire arrondi à l'unité (voir encadré E2 pour une définition du compte fractionnaire).

Source : base OST, WoS, calculs OST-Hcéres.

sciences sociales ont aussi amélioré leur indice d'impact, mais il reste 10 % en dessous de la moyenne mondiale. La biologie appliquée-écologie et les sciences de la Terre et de l'Univers conservent des indices 10 % au-dessus de la moyenne mondiale, mais enregistrent un recul depuis 2010.

Le tableau 5 compare le nombre de publications et les indices de spécialisation et d'impact de 10 domaines dans lesquels la France est la plus spécialisée avec ceux de l'Allemagne et du Royaume-Uni. Les domaines correspondent aux sous-panels du Conseil européen de la recherche (ERC) pour lesquels une correspondance a été établie avec les publications.

C'est dans le domaine « étude du passé humain » que la France est le plus fortement spécialisée (indice 1,9). Le Royaume-Uni est encore plus spécialisé dans ce même domaine (indice 2,5). Les publications de ce dernier ont par ailleurs un impact très supérieur. L'Allemagne n'est pas spécialisée, mais ses publications ont un impact aussi supérieur à celui des publications de la France. La France est fortement spécialisée dans un autre domaine des sciences humaines — Cultures et production culturelle — et la comparaison avec le Royaume-Uni et l'Allemagne donne un positionnement relatif similaire.

Les trois pays ont quatre domaines de spécialisation en commun : sciences de l'Univers, biologie cellulaire, immunité et infectiologie, biologie environnementale. Dans ces quatre cas, les indices d'impact de la France sont cependant inférieurs à ceux de ses deux voisins.

## **Conclusion et perspectives**

Entre 2010 et 2022, les publications scientifiques mondiales ont poursuivi leur augmentation historique avec une croissance de plus de 80 %. La part de copublications internationales a aussi continué à augmenter dans la plupart des pays pour représenter 25 %. L'augmentation des publications est nourrie par la participation croissante des pays émergents aux activités de recherche, mais le dynamisme varie aussi entre pays à haut revenu. De 2010 à 2022, le nombre de publications de la France a augmenté de 2,2 %, alors qu'il augmentait de plus de 25 % en Allemagne ou aux Pays-Bas et de 58 % en Italie. En conséquence, si l'Allemagne et le Royaume-Uni ont régressé d'un rang en nombre de publications depuis 2010, la France est passée du 6<sup>e</sup> rang derrière le Japon au 13<sup>e</sup> rang, avec une part équivalente à celle du Brésil.

L'analyse du profil disciplinaire de la France suggère que croissance du nombre de publications et spécialisation par discipline et sous-disciplines interagissent. La France est la plus spécialisée dans des disciplines qui croissent peu (physique) et sont dans certains cas aussi de taille modeste (sciences humaines, mathématiques). À l'inverse, sa part relative de publications est faible ou en recul dans des disciplines dynamiques (informatique, sciences sociales) ou de grande taille (sciences pour l'ingénieur, chimie). De ce point de vue, la structure disciplinaire des publications françaises peut avoir une influence négative sur leur dynamisme. En même temps, l'analyse à un niveau plus fin indique que la faible croissance des publications dans des domaines très dynamiques pourrait freiner l'évolution de

la structure disciplinaire de la France. Ainsi, l'analyse des publications en intelligence artificielle ou sciences de l'environnement suggère que la faible croissance des publications françaises a pu peser sur le tassement des indices de spécialisation de la France en informatique et en sciences de la Terre et de l'environnement, respectivement. Le faible dynamisme des contributions françaises semble ainsi se nourrir à la fois de composantes transdisciplinaires et d'un engagement spécifique dans certaines disciplines par rapport aux dynamiques mondiales.

L'impact scientifique des publications françaises s'est tassé depuis 2010 — avec un indicateur normalisé à la moyenne mondiale depuis le milieu des années 2010. Cette évolution concerne la plupart des disciplines, avec néanmoins deux exceptions importantes, la recherche médicale et les sciences sociales dont les indicateurs d'impact progressent. Dans le cas des sciences sociales, l'évolution favorable se double d'une augmentation de l'indice de spécialisation, même s'il reste relativement faible par rapport à d'autres pays à haut revenu.

Les évolutions observées sont importantes pour considérer la position scientifique de la France dans le monde, mais aussi sa capacité d'innovation. En effet, différentes analyses ont montré que les publications scientifiques citées dans des brevets tendent à être parmi les plus citées par d'autres publications scientifiques <sup>7</sup>.

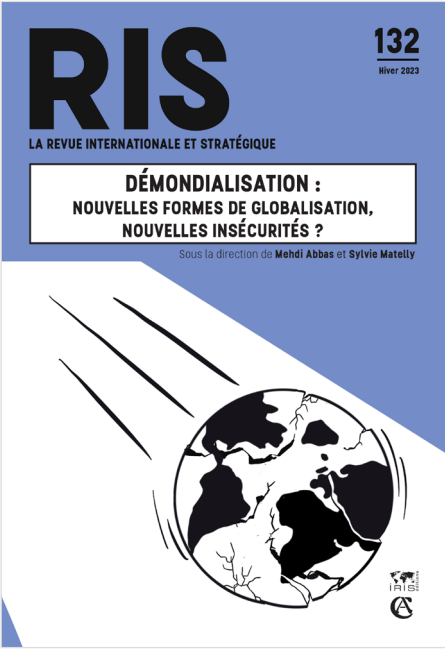
Différentes analyses complémentaires sont nécessaires pour bien comprendre la trajectoire de la France et ses perspectives. La question de l'engagement de la recherche française dans des domaines de recherche émergents pourrait être approfondie à travers des analyses à partir de corpus thématiques spécifiques. Ces analyses pourraient comporter un examen de la position de la France dans les publications citées par des brevets, ou des recommandations pour la pratique clinique s'agissant du domaine biomédical. En outre, la distinction entre différentes institutions françaises pourrait permettre de voir si certaines s'engagent plus rapidement dans ces domaines émergents — tout en tenant compte des interactions fortes entre institutions à travers les unités de recherche communes qui caractérisent la recherche française.

---

7. Voir AHMADPOOR Mohammad et JONES Benjamin F., « The Dual Frontier: Patented Inventions and Prior Scientific Advance », *Science*, vol. 357, n° 6351, 11 août 2017, p. 583-587. URL : <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aam9527> ; et QUÉMÉNER Justin, MIOTTI Luis et MADDI Abdelghani, « Technological Impact of Funded Research: A Case Study of Non-patent References », *Quantitative Science Studies*, novembre 2023. URL : <https://osf.io/preprints/socarxiv/cx8fy>. Consultés le 28 novembre 2023

Un autre axe d'analyse consiste à développer des indicateurs à partir des bases de publications ouvertes comme OpenAlex (évoquée dans l'encadré E1). De premières explorations à partir de différentes bases mondiales n'indiquent pas une modification de la position de la France ou de ses institutions de recherche, mais cette question mérite d'être instruite plus complètement en s'appuyant sur l'amélioration de la qualité des données ouvertes.

Il faudrait en outre mettre ces différentes analyses des résultats en regard de l'évolution des ressources du système de recherche et d'enseignement supérieur français, ainsi que de son organisation singulière. Ce type d'analyse pose lui-même la difficulté de la disponibilité et de la comparabilité des données pertinentes entre pays. ■



**RIS**  
LA REVUE INTERNATIONALE ET STRATÉGIQUE

**132**  
Hiver 2023

**DÉMONDIALISATION :  
NOUVELLES FORMES DE GLOBALISATION,  
NOUVELLES INSÉCURITÉS ?**

Sous la direction de Mehdi Abbas et Sylvie Matelly

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

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

IRIS  
éditions



**Vigie Alimentation évolue. Désormais réalisé en partenariat avec Ceresco, cet observatoire de l'association Futuribles International a pour objectifs :**

- ▶ de fournir à ses participants des analyses prospectives sur l'ensemble des maillons du système alimentaire (de la production à la consommation) ;
- ▶ de décrypter les transformations majeures, identifier les émergences, mettre en avant les controverses, questionner les idées reçues.

Ses réflexions croisent les échelles géographiques pertinentes selon les sujets abordés (France, approche infranationale, européenne, mondiale).

### **Vigie Alimentation donne accès, chaque année, à :**

- ▶ **1 rapport** mettant en perspective les faits marquants qui ont animé les grandes thématiques du système alimentaire,
- ▶ **4 analyses prospectives** sur des thématiques majeures,
- ▶ **4 ateliers de prospective** en lien avec les thématiques des analyses prospectives,
- ▶ **6 notes de veille.**

### **Thématiques 2024 :**

- ▶ Les adaptations du système agroalimentaire face aux tensions et aux concurrences croissantes sur les ressources (eau, foncier, énergie).
- ▶ Les comportements alimentaires.
- ▶ La transition agroécologique.



## **CONDITIONS D'ACCÈS**

- ▶ **Membres partenaires de Futuribles International** : accès inclus dans l'adhésion. Inscription aux ateliers sur demande auprès d'Aude Houguenague.
- ▶ **Devenir membre partenaire** : <https://www.futuribles.com/devenez-membre-de-futuribles-international/>
- ▶ **Organismes non partenaires de Futuribles International** : souscription annuelle de 2900 euros HT (3480 euros TTC, TVA à 20 % incluse).

# Comparaisons statistiques dans le temps et l'espace

## Vertus et limites des données

Par Jean Baneth <sup>1</sup>

---

*Lorsqu'on réfléchit à l'avenir, la question des indicateurs utilisés pour construire les analyses et servir de base aux projections est essentielle. Bien des indicateurs sont imparfaits, en témoignent les réflexions récurrentes sur la création de richesse ou sur la mesure du revenu national d'un pays, dont on sait qu'elles ne suffisent pas à estimer le bien-être d'une population. Mais au-delà même de la nature des indicateurs choisis, la question de la pertinence des comparaisons que l'on peut en faire dans le temps comme dans l'espace constitue un autre point d'attention sur lequel on s'attarde rarement. Or, comme le montre ici Jean Baneth, économiste ayant dirigé le département d'économie internationale de la Banque mondiale, il faut rester prudent en la matière et ne pas faire dire aux statistiques plus qu'elles ne peuvent signifier. Son article explique en effet que, selon la méthodologie utilisée pour calculer les indices de prix afin de procéder à des comparaisons dans le temps ou entre pays, selon le mode de comparaison retenu des prix des biens ou des niveaux de revenu (valeurs nominales ou parités de pouvoir d'achat), selon même le niveau de qualité des biens comparés, les conclusions de telles comparaisons statistiques peuvent changer substantiellement. Jean Baneth présente ici un certain nombre de subtilités (sinon biais) dans l'interprétation des comparaisons statistiques, afin que leurs utilisateurs disposent de quelques clefs pour éviter les écueils ou, à tout le moins, aient conscience de leurs limites. S.D.*

**L**a meilleure prise en compte des enjeux de long terme dans les décisions et les actions qui engagent l'avenir, qui fait partie des objectifs de la revue *Futuribles*, exige une bonne prise en compte du présent et du passé dont l'avenir sera issu. Elle passe néces-

---

1. Ancien directeur de l'International Economics Department de la Banque mondiale, ancien chercheur associé au Rajiv Gandhi Institute (New Delhi) et professeur d'économie invité au CERDI (Centre d'études et de recherches sur le développement international) de l'université Clermont Auvergne, et ancien conseiller bénévole du gouvernement vietnamien à Ha Noi.

sairement par une bonne compréhension des statistiques qui les décrivent.

Pour comprendre le présent d'un pays nous devons le situer par rapport à son propre passé et par rapport à d'autres pays. Rien d'étonnant donc à ce qu'un historien précise que les 10 millions de roupies que le prince indien Siraj destinait à son armée dans les années 1750 équivalent à « 390 millions de livres sterling aujourd'hui<sup>2</sup> », ni à ce que des économistes, et de plus en plus de journalistes et autres non-économistes, expriment prix et revenus de tous pays en parité de pouvoir d'achat (PPA), censée attribuer une valeur identique aux mêmes produits dans tous les pays.

Ces mesures sont utiles quand elles sont bien faites. Elles nous apportent des informations qui permettent de mieux appréhender la réalité. Cependant, elles doivent être traitées avec prudence car la nature même de la réalité fait que l'on ne peut pas mesurer sans ambiguïté certains de ses aspects.

## Le problème des indices

On entend couramment que « les prix ont augmenté de tant », mais que doit-on comprendre précisément par-là ? On peut légitimement demander quelle est la différence entre la valeur de l'ensemble (appelons-le « panier ») des biens produits (produit intérieur brut, PIB) ou utilisés telle qu'elle était pendant une première période, et la valeur du même panier aux prix qui prévalent en deuxième période. La mesure de cette différence s'appelle indice de Laspeyres (voir encadré ci-contre).

Mais cette question et cette mesure ne sont pas les seules intéressantes et légitimes. La composition du panier change avec le temps, et il peut aussi être utile de savoir combien le panier consommé ou produit en deuxième période aurait coûté pendant une première période. L'indice de Paasche mesure la différence entre ces valeurs de début et de fin. On se réfère aussi à une moyenne géométrique de ces deux indices, l'indice de Fisher, surnommé « idéal ». Or il est impossible de réconcilier ces indices : on appelle cette impossibilité « le problème des indices ».

Alors que les économies de marché utilisent l'indice de Laspeyres pour mesurer les variations des prix à la consommation, l'URSS et

---

2. DALRYMPLE William, *The Anarchy: The Relentless Rise of the East India Company*, Londres : Bloomsbury, 2019, p. 84.

## LES INDICES DES PRIX DE LASPEYRES ET DE PAASCHE

Les indices de Laspeyres et de Paasche portent le nom des deux statisticiens allemands — Étienne Laspeyres [1834-1913] et Hermann Paasche [1851-1925] — qui les ont présentés en premier lieu.

• **L'indice des prix de Laspeyres** est une formule statistique qui mesure l'évolution du prix du panier de biens et services utilisés au cours d'une période initiale de référence, à partir de la même période initiale et jusqu'à la période finale de référence.

• **L'indice des prix de Paasche** est une formule statistique qui mesure l'évolution du prix du panier de biens et services utilisés au cours d'une période finale de référence, à partir d'une période initiale et jusqu'à cette période finale.

• **L'indice de Fisher** (parfois dit idéal) est la moyenne géométrique des deux indices précédents.

Par « utilisés », entendons consommés, ou encore produits, investis

ou même exportés ou importés. Notons aussi qu'aucun indice ne peut réellement tenir compte de produits qui n'existaient pas pendant la période initiale, ou n'existent plus pendant la période finale. Ainsi, il n'est pas possible de dire comment ont évolué les prix des téléphones portables de 1973 à 2023 ; ni à peine mieux ce que valent, aux prix de 1923, les services rendus par les rémouleurs parisiens en 2023. On peut néanmoins élaborer des indices, notamment en reliant en chaîne les indices portant sur des périodes aussi courtes que possible, en négligeant les petites modifications de la composition des paniers pendant ces courtes périodes. Mais envers la transposition sur un plus long terme des résultats de tels calculs, il faut être toujours très prudent et souvent sceptique. Prudence et scepticisme s'imposent encore plus pour les comparaisons dans l'espace. ■

J.B.

ses satellites utilisaient l'indice de Paasche<sup>3</sup>. Du point de vue de la théorie statistique, l'utilisation de l'un ou l'autre indice est également défendable. Mais pour les responsables d'économies sujettes à des pénuries soudaines et sévères, l'indice de Paasche présentait d'indéniables avantages. Supposons ainsi qu'en première période, le panier de consommation ait inclus 100 kilos de viande et 100 kilos de rutabaga, chacun coûtant un rouble le kilo. Puis une pénurie soudaine frappe le marché de la viande qui disparaît pratiquement du panier de consommation alors que son prix passe à 10 roubles le kilo. Le prix du rutabaga ne change pas et sa consommation passe à 500 kilos pour compenser les calories perdues. Le prix du panier

3. Avec l'abandon de l'économie planifiée et l'adhésion aux institutions financières internationales, ces pays ont adhéré aux méthodes et définitions déjà utilisées dans le reste du monde.

initial passe de 200 à 1 100 roubles, et d'une base 100 en première période l'indice des prix de Laspeyres passe à 550. Le panier ne contenant pratiquement plus que du rutabaga dont le prix n'a pas changé, l'indice de Paasche indique des prix stables puisqu'il mesure le changement de prix du panier final. Si par bonheur, le prix du rutabaga avait baissé, les statisticiens soviétiques pouvaient même faire état d'une baisse des prix.

Les valeurs (du PIB, de la consommation, des investissements...) étant le produit des volumes par les prix, elles sont aussi affectées par le problème des indices. Le taux de croissance du PIB à prix constants diffère selon l'année de base choisie pour les prix et pour les volumes.

Nous n'avons jusqu'ici considéré que les situations où seule change la proportion des divers produits contenus dans le panier, mais la nature des produits reste la même. En réalité, des produits nouveaux apparaissent tout le temps et d'autres, devenus obsolètes, disparaissent. Cependant, il est rare que la composition des paniers change radicalement d'une année sur l'autre. On peut multiplier en chaîne les variations annuelles des indices pour en tirer une variation sur le long terme. Il est légitime de dire, parce que c'est à peu près correct, que la Grande-Bretagne a connu un taux moyen d'inflation de 2,2 % depuis deux siècles. Mais à long terme les petits changements s'accumulent. Une moyenne annuelle d'inflation de 2,2 % pendant deux siècles équivaut à une multiplication par environ 80. On ne peut pourtant pas obtenir le panier de produits d'il y a 200 ans pour 80 fois leur prix d'alors, et encore moins aurait-on pu, il y a 200 ans, obtenir pour un quatre-vingtième de son prix actuel le panier présent de produits. On nous dit que les 10 millions de roupies que cherchait Siraj vers 1750 « équivalent à 390 millions de livres sterling aujourd'hui » ; mais que veut dire « équivalent » pour une somme qui ne lui aurait pas permis d'acheter la moindre mitraille ?

De même, en enchaînant les taux de croissance annuels on peut dire que de 2000 à 2022, le PIB français à prix constants a augmenté en moyenne de 1,44 % par an. Cela ne signifie pourtant pas vraiment qu'il était 37 % plus élevé en 2022 qu'en 2000, puisqu'on y trouvait en 2022 des produits qui n'existaient pas en 2000, et que certains produits de l'an 2000 avaient fini par disparaître.

Ce qui est vrai sur 22 ans l'est bien plus à plus long terme. Une publication de l'OCDE nous dit qu'en l'an 1000 le revenu national par

habitant de l'Europe occidentale était de 400 dollars US de 1990<sup>4</sup>. Pourtant, on ne pouvait, en l'an 1000, obtenir aucun des produits disponibles en 1990, ni même recomposer en 1990 pour 400 dollars US le panier des produits de l'an 1000. Que nous apprennent donc, sur le contenu et le niveau des productions et revenus de l'an 1000, ces 400 dollars US de 1990 ?

Laissons le temps, venons-en à l'espace. Pour la bonne compréhension des économies, il est nécessaire de comparer les données nationales, et parfois de les combiner. Le plus simple est de les convertir en une monnaie commune au taux de change du marché, mais cette méthode laisse beaucoup à désirer. Un premier problème est bien illustré par le rapport au dollar US de l'euro, qui valait 0,84 dollar US le 20 novembre 2000, 1,58 dollar US le 14 juillet 2008, 0,97 dollar US le 3 octobre 2022, 1,12 dollar US le 14 juillet 2023, et est passé de 1,06 à 1,09 dollar US entre le 1<sup>er</sup> et le 21 novembre 2023. Les prix de la zone euro n'ayant pas évolué de façon très différente de ceux des États-Unis, les variations du taux de change se répercutent en variations du rapport nominal des revenus nationaux.

Un autre problème relève des prix individuels. Quel que soit le taux de change, certains produits sont plus chers ici que là, et ces différences de prix d'un pays à l'autre ne sont pas uniformes. D'où la tentation de résoudre les deux problèmes en abandonnant la conversion par le taux de change et en assignant à tous les produits le même prix partout. Cela s'appelle établir les parités de pouvoir d'achat (PPA) et c'est ce que vise le Programme de comparaison internationale (sigle anglais ICP pour *International Comparison Program*) auquel 176 économies participent aujourd'hui. On fait de nos jours un très large usage des PPA pour comparer les revenus nationaux et leurs composantes (consommation, investissements...) <sup>5</sup>.

Il faut pour cela résoudre deux types de problèmes. Le premier est une variante du problème des indices. Les produits faisant l'objet de commerce international tendent à avoir des prix similaires partout, alors que les prix des services simples reflètent les différences des revenus du travail et donc sont bas dans les pays pauvres ; ces services y sont généralement plus abondants aussi <sup>6</sup>.

---

4. MADDISON Angus, *The World Economy. Volume 1: A Millennial Perspective*, Paris : OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques), 2006, p. 30.

5. Pour quelques références utiles sur les PPA, voir l'encadré page suivante.

6. Voir notamment BALASSA Bela, « The Purchasing-Power Parity Doctrine: A Reappraisal », *Journal of Political Economy*, vol. 72, n° 6, décembre 1964, p. 584-596. URL : <https://www.jstor.org/stable/1829464> ; et BANETH Jean, « La théorie de la parité des pouvoirs d'achat : un nouveau réexamen »,

## RÉFÉRENCES UTILES SUR LES PPA

Pour une discussion méthodologique des PPA, voir notamment :

- *Purchasing Power Parities and Real Expenditures of World Economies: Summary of Results and Findings of the 2011 International Comparison Program*, Washington, D.C. : Banque mondiale, respectivement 2014. URL : <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/150971487105181565-0050022017/original/SummaryofResultsandFindingsofthe2011InternationalComparisonProgram.pdf>
- Et pour les derniers résultats, *Purchasing Power Parities and the Size of World Economies: Results from the 2017 International Comparison Program*, Washington, D.C. : Banque mondiale, 2020. URL : <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/d508f4dd-1075-579f-843d-cae5631a0a61/content>

Voir aussi la discussion provoquée par l'article de David Henderson (ancien chef économiste de l'OCDE), ma propre critique et la

suite donnée par Lawrence Summers, ancien secrétaire du Trésor américain :

- HENDERSON David, « Comparing Real GDP across Countries: The Issues Revisited », *Economic Affairs*, vol. 35, n° 2, juin 2015, p. 286-298. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ecaf.12128>
- BANETH Jean, « Comparing Real GDP Across Countries: Comment and Rejoinder », *Economic Affairs*, vol. 36, n° 1, février 2016, p. 84-88. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ecaf.12153>
- SUMMERS Lawrence H., « Comparing Real GDP Across Countries: Comment », *Economic Affairs*, vol. 36, n° 1, février 2016, p. 221-223. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ecaf.12184> ■

J.B.

URL consultés le 10 novembre 2023.

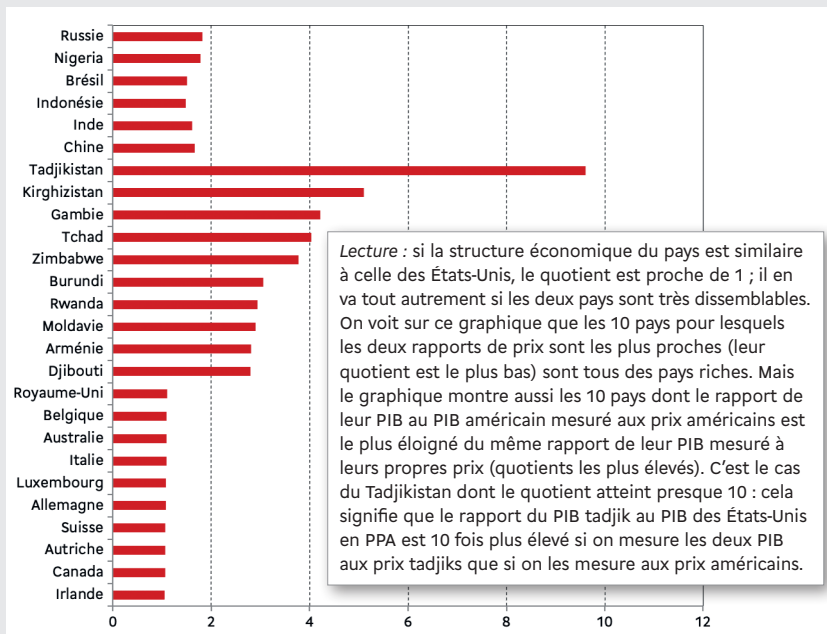
Or, la première comparaison internationale des prix attribuait les prix américains à toutes les composantes nationales. Un des résultats de ce choix fut que la distance entre revenus des pays pauvres et riches apparaissait plus faible que si on avait utilisé les prix indiens.

L'ICP utilise maintenant comme prix internationaux la moyenne pondérée des prix des pays participants. Le choix de cette variante de l'indice de Fisher paraît moins subjectif que celui d'un système national, mais d'autres méthodes sont possibles dont le choix modifierait le niveau des revenus et leur classement international. Par ailleurs, les pays riches dominent cette pondération, donc les prix internationaux sont assez proches de leurs prix nationaux. En 2022, le revenu en PPA des États-Unis ne dépassait son équivalent

---

*Revue d'économie du développement*, vol. 2, n° 1, 1994, p. 35-72. URL : [https://www.persee.fr/doc/recod\\_1245-4060\\_1994\\_num\\_2\\_1\\_895](https://www.persee.fr/doc/recod_1245-4060_1994_num_2_1_895). Consultés le 10 novembre 2023.

**Graphique 1. Quotient du rapport du pouvoir d'achat du PIB d'un pays à celui des États-Unis mesuré aux prix américains, au même rapport mesuré aux prix du pays concerné**



Source : DEATON Angus et HESTON Alan, « Understanding PPPs and PPP-Based National Accounts », *American Economic Journal: Macroeconomics*, vol. 2, n° 4, octobre 2010, p. 1-35.

nominal que de 1,5 % et dans la plupart des pays riches, l'écart ne dépassait pas un tiers <sup>7</sup>.

Les différences sont autrement élevées concernant les pays pauvres. Ainsi le revenu par habitant nominal de l'Inde représente 3,1 % <sup>8</sup> de celui des États-Unis alors qu'en PPA, il en représente 10,6 %. Pour la Turquie, les chiffres correspondants sont de 13,8 % et 47,6 %, et pour la Chine, de 16,9 % et 27,4 %. Aux prix indiens, turcs ou même chinois, les différences entre revenus nominaux et revenus PPA des pays pauvres auraient été bien moindres, et celles entre leurs revenus et ceux des pays riches bien plus élevées. L'insoluble problème des indices fait que le rapport des revenus nationaux est fortement influencé par le système de prix choisi ou

7. Quelques petits pays riches font exception, tels Singapour et le Qatar. Ils font appel à une forte main-d'œuvre immigrée dont les très bas salaires font baisser le prix de certains services vers des niveaux proches de celui de pays beaucoup plus pauvres.

8. Méthode dite de l'Atlas de la Banque mondiale. URL : <https://datahelppdesk.worldbank.org/knowledgebase/articles/378832-what-is-the-world-bank-atlas-method>. Consulté le 10 novembre 2023. Voir l'explication plus loin dans cet article. La valeur PPA est aussi publiée dans l'Atlas.

élaboré pour les mesurer — et si tel ou tel système peut sembler préférable aux autres, aucun ne s'impose comme incontournable.

Autre conséquence inévitable et pourtant dérangeante de l'élaboration des prix internationaux à partir des prix de tous les participants : les rapports bilatéraux sont influencés par les prix et revenus des autres pays. Si la Corée du Nord venait à se joindre à l'ICP, si le prix de l'électricité baissait en Allemagne, si l'Inde accélérât sa croissance, cela changerait le rapport PPA du revenu chinois au revenu américain.

## Désigner des produits identiques, tenir compte de la qualité

Il faut identifier les produits auxquels on doit assigner le même prix. Pour les comparaisons dans le temps, cela devient rapidement impossible — on aurait du mal à reconstituer en 2023 le panier de produits de 1973, et il serait impossible de constituer le panier de 2023 avec des produits de 1973. Mais les comparaisons entre pays présentent aussi beaucoup de difficultés.

Malgré la mondialisation, on ne trouve pas des produits identiques dans tous les pays. Les premiers cycles de l'ICP faisaient peu de cas des différences de qualité — une bouilloire était une bouilloire, même si elle tombait vite en panne, et une appendicectomie était une appendicectomie quel que fût le taux de survie dans l'hôpital, ou son confort. Les cycles récents s'efforcent de mieux tenir compte de la qualité des produits, mais comment déterminer la différence de prix qui devrait compenser une différence de qualité ?

Les pays riches font grande consommation de fruits tropicaux, coûteux en raison du transport. Ce serait beaucoup relever le revenu PPA des pays exportateurs si on y attribuait le même prix à ces fruits. Pour éviter cet écueil, l'ICP ne traite pas les produits de la même façon selon qu'ils sont locaux et ordinaires ou importés et rares. Ou encore, la baguette coûte de 0,90 euro à 1,40 euro en France et des boulangeries de luxe la vendent deux à trois fois plus cher aux États-Unis. L'ICP fait entrer ces produits pourtant très semblables en des catégories différentes parce que leurs fonctions diffèrent. Mais même entre des produits locaux, il est difficile de déterminer si l'un d'eux coûte plus parce qu'il est plus cher ou parce qu'il est meilleur<sup>9</sup>.

---

9. Par exemple, Google affiche, sur une même page *Web*, quatre paquets de 20 onces (environ 567 grammes) de pain américains dont les prix vont de 1,39 dollar US à 5,79 dollars US. Comme

Le problème devient encore plus difficile pour les services, justement la catégorie de produits dont le prix nominal diffère le plus du prix international dans les pays pauvres. S'agissant des services non marchands, le prix est établi à travers leurs coûts de production. Mais quels sont vraiment ces coûts ? Faut-il y inclure les enveloppes glissées aux fonctionnaires, voire aux médecins hospitaliers ? Les pots-de-vin font-ils partie du coût ou diminuent-ils la valeur des services rendus ? Ou doit-on ne pas en tenir compte ? — ce qui semble bien le choix de l'ICP. Doit-on dire que le travail d'un fonctionnaire ou d'un policier, plus ou moins efficace et honnête, équivaut à celui d'autres et leur attribuer le même prix international, ou tenir compte de leur véritable efficacité, si nous savions la mesurer ?

Les problèmes soulevés par l'immobilier sont, si on peut dire, encore plus insolubles. Partout, son prix dépend de l'adresse. Un bureau ou un appartement identique a en France un coût fort différent selon que son code postal est 75007 ou 13005. Ces différences sont déterminées par le marché et compensent les désavantages d'un quartier difficile ou l'attrait d'un voisinage huppé. Mais quand on compare les prix de locaux intérieurement identiques à Bamako, Bogota et Boston, comment faire la part des vraies différences de prix qui doivent avoir un impact sur les revenus en PPA, et de celles qui ne font que compenser les différences de qualité ?

Tous ces problèmes doivent être résolus de façon arbitraire : il faut effectivement arbitrer entre des solutions toutes imparfaites. Il faut d'abord choisir le système de prix international et arbitrer entre prix d'un pays (le choix du début) ou une moyenne plus ou moins élaborée<sup>10</sup>. Chacun de ces choix définit une hiérarchie différente de prix et de revenus. On doit aussi définir l'équivalent français d'un repas de sagou (moelle de tronc de palmier) pris aux Moluques et des services d'un policier chinois. Chacune de ces centaines de décisions arbitraires influence le calcul des parités de pouvoir d'achat.

L'impact des décisions méthodologiques est bien illustré par la variation des résultats de cycle en cycle de l'ICP. Ainsi, avec un seuil de pauvreté en prix constants pourtant inchangé, le pas-

---

les consommateurs sont censés maximiser la satisfaction que leur apportent leurs achats, ces différences de prix sont censées refléter des différences de qualité. Mais comment déterminer quels sont les équivalents français de ces pains, et quels ajustements de prix à appliquer aux autres pains pour compenser les différences de qualité ?

10. Les actuels prix internationaux sont dérivés d'une double moyenne à l'intérieur de groupes géographiques et entre ces groupes.



© Shutterstock, respectivement Curioso.Photography à gauche / Mickis-Fotowelt à droite

sage des données PPA de 1985 à celles de 1993 a fait baisser de 35 % le nombre comptabilisé par la Banque mondiale de personnes vivant sous ce seuil en Amérique latine et l'a accru de 27 % en Afrique subsaharienne. Puis le passage des données de 1993 à celles de 2005 a fait doubler ce nombre en Asie de l'Est et fait augmenter le total mondial d'un demi-milliard de personnes <sup>11</sup>. Ces variations sont du même ordre que celles que provoque l'évolution des taux de change. Mais ce qui les distingue, c'est que celles-là dépendent du marché, celles-ci des choix arbitraires des statisticiens.

## Bien-être, puissance industrielle, force militaire

Réflexions philosophiques à part, on sait que plus forte consommation n'est pas synonyme de plus grand bien-être. Le ménage obligé de se chauffer en hiver, l'employé qui fait 50 kilomètres pour aller au travail consomment plus que ceux qui jouissent d'hivers doux et travaillent près de leur domicile. On attend tout de même des PPA une meilleure compréhension du bien-être individuel, des capacités productives, voire de la puissance militaire des pays concernés. Mais on peut douter qu'on l'obtienne.

Nous avons vu que la valeur nominale du revenu national par habitant de l'Inde représente 3,1 % de son équivalent américain alors qu'en PPA, avec les méthodes actuelles, elle en vaut 10,6 % et que cette différence est surtout due au bas coût de divers services. Or, le bien-être marginal que procurent les produits consommés correspond à leur coût, c'est-à-dire à la mesure de leur prix nominal,

11. JOLLIFFE Dean et BEER PRYDZ Espen, « Global Poverty Goals and Prices: How Purchasing Power Parity Matters », *Policy Research Working Paper*, n° 7256, mai 2015, Banque mondiale. URL : <https://elibrary.worldbank.org/doi/pdf/10.1596/1813-9450-7256>. Consulté le 10 novembre 2023.

pas à celle du prix international. S'ils devaient payer les services à leur prix américain ou international, les consommateurs indiens en achèteraient beaucoup moins. Les valeurs PPA des revenus nationaux représentent moins fidèlement le bien-être des consommateurs que les valeurs nominales.

Qu'en est-il de la puissance militaire et de la capacité industrielle ? Dans une économie efficace, les ressources produisent les mêmes valeurs marginales dans tous les secteurs — transférer une unité de capital ou de travail d'un secteur à un autre ne change pas la valeur totale produite. Aucune économie n'atteint en réalité cette efficacité parfaite — mais beaucoup s'en approchent. Or, ces valeurs marginales sont mesurées en prix nominaux. Pourvu que la mesure PPA de ces secteurs tienne bien compte des différences de qualité des dépenses militaires (ou des investissements) — ce qui est bien difficile — elle reflète la réalité mieux que leurs valeurs nominales. Mais les potentiels dont la réalisation demanderait le transfert de ressources entre secteurs sont mieux mesurés par les prix nominaux que par les PPA. Les revenus nationaux mesurés en PPA ne reflètent pas fidèlement le potentiel économique.

## Comment s'y retrouver ?

L'IPC apporte des connaissances utiles sur la structure des prix et leurs niveaux relatifs, mais ses résultats dépendent de choix arbitraires entre une infinité de méthodes de calcul. De plus, quelle que soit la méthode, les rapports des revenus nationaux (totaux ou par habitant) en PPA ne donnent pas nécessairement une meilleure indication des rapports de bien-être personnel ni des potentiels industriels ou militaires, que les rapports nominaux.

La distance qui nous sépare de l'avenir souhaité se mesure en années et sa durée dépend du point de départ et de la vitesse de croissance. Le taux de croissance de l'économie mondiale égale la moyenne pondérée des taux nationaux — mais quelle pondération, quel point de départ ? Le Fonds monétaire international (FMI) et l'OCDE utilisent une pondération par les valeurs PPA ; la Banque mondiale, par les valeurs nominales converties aux taux de change<sup>12</sup>. On peut discuter des méthodes d'agrégation — mais une des causes des ajustements substantiels que subissent les chiffres

---

12. Voir CALLEN Tim, « Purchasing Power Parity: Weights Matter », *Finance & Development / Back to Basis*, février 2020, FMI. URL : <https://www.imf.org/-/media/Files/Publications/Fandd/Back-to-Basics/callen-purchasing-power-parity.ashx>. Consulté le 10 novembre 2023.

lors de chaque nouveau cycle de l'ICP est le porte-à-faux de l'application au PIB PPA de taux de croissance tirés des statistiques portant sur les valeurs nominales.

Pour calculer quand le revenu indien rattrapera celui des États-Unis, le revenu en PPA ne serait un point de départ meilleur que le revenu nominal que si les secteurs à bas prix — ceux dont le prix PPA diffère le plus du prix nominal — devaient croître aussi rapidement que les autres. Ils occuperaient alors une part de plus en plus importante du PIB à mesure que leurs prix nominaux tendaient à rattraper les prix internationaux. Ce n'est pas assuré.

Le niveau des revenus par habitant a une valeur opérationnelle, notamment pour déterminer l'éligibilité aux prêts concessionnels de la Banque mondiale. Il y a plus de 40 ans, le conseil d'administration de cette institution a considéré comment calculer ces valeurs de référence. La méthode de l'Atlas privilégie le calcul des revenus nationaux par habitant en valeur nominale. Afin d'atténuer les fluctuations, elles sont converties en dollars US à la moyenne des taux de change réels (ajustés pour les variations de prix) des trois dernières années. Cette méthode est certes imparfaite, mais elle est claire et objective — elle n'est pas sujette aux variations dues aux changements arbitraires du calcul. Elle a été approuvée à l'unanimité par le conseil d'administration de la Banque mondiale et est toujours en vigueur.



Les calculs statistiques complexes, tels ceux portant sur les indices de prix ou les revenus nationaux en PPA ne sont pas les seuls moyens de mieux connaître notre passé et nos voisins. Depuis longtemps la revue *The Economist* publie son « indice Big Mac » : le prix du Big Mac de McDonald's, produit *standard*, donne aussi une indication du niveau général des prix<sup>13</sup>. Il existe d'autres signaux simples, tels que le salaire de base, le prix d'un repas ou celui d'une coupe de cheveux... Chaque signal pris à part diffère souvent des autres, mais l'ensemble donne une idée des prix et des revenus, et permet de faire des comparaisons. Ils nous indiquent rarement le rapport précis d'un revenu national à un autre, mais fournissent souvent une image composite précieuse. Ainsi, un récent *podcast* de la BBC s'interroge sur l'équivalent actuel du revenu annuel de

---

13. « Our Big Mac Index Shows How Burger Prices Are Changing », *The Economist*, 3 août 2023. URL : <https://www.economist.com/big-mac-index>. Consulté le 10 novembre 2023. Voir également PAGLIA Morgan, « Ce que révèle le prix du Big Mac sur l'inflation », en p. 103 de ce numéro (NDLR).

10 000 livres sterling vers 1810 d'un personnage de Jane Austen <sup>14</sup>. Il donne trois réponses : 800 000, 10 millions ou même 61 millions de livres. Ensemble ces trois chiffres peuvent nous en apprendre bien plus que la simple expression « tant en livres sterling 2010 ». Il ne s'agit certes pas de s'en contenter à la place des calculs complexes d'indices et de PPA, mais de ne pas négliger les renseignements supplémentaires qu'ils peuvent nous apporter.

Il serait bon de savoir établir des vraies équivalences, exactes et uniques, entre productions et revenus anciens et modernes, entre productions et revenus de différents pays. Il serait bon de savoir le faire, mais on ne le sait pas. Rappelons-nous alors les mots de Voltaire <sup>15</sup> : « Il est bien triste [...] de ne savoir pas... Je l'avoue ; mais il est bien plus triste et beaucoup plus sot de croire savoir ce qu'on ne sait pas. » ■

---

14. « How Rich Was Jane Austen's Mr Darcy? », BBC (British Broadcasting Corporation), 28 novembre 2017. URL : <https://www.bbc.co.uk/programmes/w3csvq3g>. Consulté le 10 novembre 2023.

15. VOLTAIRE, « Idée », in *Dictionnaire philosophique*, version de 1878 des éditions Garnier, tome 19. URL : [https://fr.wikisource.org/wiki/Dictionnaire\\_philosophique/Garnier\\_\(1878\)/Id%C3%A9e](https://fr.wikisource.org/wiki/Dictionnaire_philosophique/Garnier_(1878)/Id%C3%A9e). Consulté le 10 novembre 2023.

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

### DES PARUTIONS QUOTIDIENNES SUR LES ENJEUX D'AVENIR

- ▶ *Êtres humains, être humain en 2050. Imaginaires, sociétés, individus en Occident. Rapport Vigie 2023* (publication biennale de Futuribles International)
- ▶ « Et si en 2050, la Méditerranée orientale n'était plus en guerre ? », chronique prospective de Robin Degron, 5 décembre 2023
- ▶ « La tokenisation : aperçu et enjeux », interview de Gabriel Sadoun, 28 novembre 2023
- ▶ « Où vivent les catégories sociales en France ? », par Louis Maurin, 21 novembre 2023
- ▶ « L'eau douce : état des lieux, enjeux et recommandations », par Véronique Lamblin, 15 mai 2023
- ▶ Des analyses d'ouvrages et travaux prospectifs : *La Colère et l'oubli* d'Hugo Micheron, *Future Risks Report 2023* d'Axa, *La Robotique : entre science, technologie et imaginaire* de Jean-Paul Laumond...

### DES OBSERVATOIRES, GROUPES DE TRAVAIL ET SERVICES DIVERS

- ▶ Groupes de travail « Géopolitique » (Ukraine, Chine), « Intelligences artificielles génératives »
- ▶ Forum prospectif Santé 2040, Forum prospectif de l'Afrique de l'Ouest, Vigie Alimentation, Forum prospectif des territoires...
- ▶ Des formations à la prospective
- ▶ Des tables rondes régulières autour d'experts sur des sujets d'avenir

*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](mailto:ahouguenague@futuribles.com)  
<https://www.futuribles.com/qui-sommes-nous/association-futuribles/presentation/>



### Menaces sur le climat : des points de basculement dépassés ?



# Marcel Boiteux avait raison

## La concurrence en électricité augmente les prix

Par Lionel Taccoen <sup>1</sup>

*Le 6 septembre 2023, Marcel Boiteux s'est éteint à l'âge de 101 ans. Président d'EDF pendant 20 ans, membre (et même président) de l'Académie des sciences morales et politiques pendant 30 ans, sa parole était écoutée et respectée dans le secteur de l'énergie — ayant même donné son nom à un prix remis chaque année par l'Association des économistes de l'énergie <sup>2</sup>. Lionel Taccoen lui rend hommage dans ce futur d'antan, en rappelant à quel point il avait été clairvoyant en 2007, lorsqu'il mettait en garde nos lecteurs, dans ces colonnes, contre la foi trop aveugle accordée au libéralisme par les autorités européennes quand elles ont décidé d'ouvrir le marché de l'électricité à la concurrence. Reprenant les arguments avancés par Marcel Boiteux dans son article, Lionel Taccoen souligne leur pertinence (renforcée par les crises diverses qui frappent l'Europe et le monde depuis quatre ans) : « Marcel Boiteux avait raison. » Peut-être trop tôt, mais son expérience à la tête d'EDF lui avait montré que l'électricité n'était pas une marchandise comme les autres, et que le service public et les tarifs de l'électricité n'auraient rien à gagner, bien au contraire, à la déréglementation. Il est probable que les usagers continueront encore longtemps à payer le prix de cette réforme malheureuse du marché de l'électricité. S.D.*

Jusqu'à l'aube du XXI<sup>e</sup> siècle, l'électricité, pour les Français, fut incarnée par Électricité de France, EDF. L'entreprise était prospère. Un commissaire euro-

péen à la Concurrence, personnage redoutable et redouté, avait déclaré devant le Parlement européen en 1993 que non seulement EDF ne coûtait rien aux

1. Contrôleur général honoraire d'EDF (Électricité de France), fut en charge de chantiers nucléaires ; ancien représentant d'EDF auprès des Institutions européennes ; ancien professeur des Universités associé..

2. Décerné en 2023 au livre d'Emmanuel Hache — dont nous publions un article dans ce numéro (voir p. 5) — et Benjamin Louvet, *Métaux, le nouvel or noir. Demain la pénurie ?*, Monaco : éditions du Rocher, 2023.

finances publiques, mais qu'elle « contribuait » au budget de l'État. Malgré cette contribution, les Français bénéficiaient, sauf cas spécifiques, de l'électricité la moins chère de l'Union européenne, vendue à prix coûtant. Cette situation devait beaucoup à un économiste de renommée internationale, Marcel Boiteux, qui dirigea EDF durant 20 ans, de 1967 à 1987.

## La difficile naissance du marché européen de l'électricité

C'est en 1987 également que les États membres de la Communauté économique européenne, qui allait devenir l'Union européenne, décidèrent d'achever avant le 1<sup>er</sup> janvier 1993 la réalisation du « grand marché intérieur », rebaptisé Marché unique. Pour cela restaient à libéraliser les industries de réseau — télécommunications et transports —, donc à introduire la concurrence entre les entreprises concernées. En juin 1987, les États membres, à l'unanimité, acceptèrent d'y ajouter l'électricité et le gaz. La libéralisation de l'électricité, ou dérégulation, se révéla fort complexe. Les quelques précédents mis en œuvre par le Chili de Pinochet, la Nouvelle-Zélande travailliste, la Californie toujours imaginative ou l'Angleterre de Margaret Thatcher donnaient des résultats incertains. La date limite du 1<sup>er</sup> janvier 1993 fut largement dépassée. Il fallut

neuf ans pour qu'une première législation européenne, acte de naissance du marché européen de l'électricité actuel, soit adoptée (décembre 1996). Presque 11 ans furent encore nécessaires avant qu'elle s'applique à tous les consommateurs (1<sup>er</sup> juillet 2007). Encore faut-il ajouter que certains États, dont la France, avaient demandé et obtenu de notables dérogations.

## La concurrence en électricité n'abaisse pas les prix

Marcel Boiteux prendra ses distances rapidement avec la libéralisation de l'électricité. Avant la dernière étape de l'ouverture à la concurrence, il souhaite adresser un message solennel à un public large, non spécialiste mais cultivé, et exerçant des responsabilités. Cet article parut dans *Futuribles* sous le titre « Les ambiguïtés de la concurrence » en juin 2007<sup>3</sup>. Dans une première partie, Marcel Boiteux explique pourquoi la concurrence ne parviendra pas à faire baisser les prix partout où la gestion précédente du secteur électrique était « décente ». Auparavant, l'électricité était vendue à prix coûtant, résultant de la somme de trois coûts : ceux de la production, de la commercialisation et de l'acheminement vers les clients. S'ajoutent aussi des taxes, mais appliquées uniformément.

Tous les fournisseurs utilisant les mêmes lignes de transport et de distribution, la concurrence n'aura

---

3. BOITEUX Marcel, « Les ambiguïtés de la concurrence. Électricité de France et la libéralisation du marché de l'électricité », *Futuribles*, n° 331, juin 2007, p. 5-16.

## Marcel Boiteux (1922-2023)

**L'homme de science.** Né le 9 mai 1922 et décédé le 6 septembre 2023, Marcel Boiteux, ancien élève de l'École normale supérieure, fut l'élève de Maurice Allais, prix Nobel d'économie<sup>1</sup>. Il s'intéressa aux industries de réseaux : ses travaux ont modifié leur gestion et plus particulièrement celle de l'industrie électrique. Il a montré comment obtenir la taille et la composition optimales d'un parc électrique tout en déterminant ses coûts. Marcel Boiteux ne fut pas lui-même prix Nobel, probablement car, comme chef d'entreprise, il gérait des intérêts particuliers, mais son apport est toujours d'actualité. Comme l'a rappelé l'économiste Jean Tirole, Marcel Boiteux fut président de la Société d'économétrie, une précision importante car cette présidence est prestigieuse et les plus grands économistes contemporains l'ont occupée : Keynes, Schumpeter, Leontief, Samuelson... Le nommer président de la Société d'économétrie était une manière, pour les économistes, de reconnaître la valeur exceptionnelle de Marcel Boiteux.



© Académie des sciences morales et politiques.

**L'industriel.** Marcel Boiteux dirigea EDF durant 20 ans (1967-1987) et en fit la plus importante entreprise d'électricité mondiale, réputée pour son efficacité. Il opta pour le nucléaire au bon moment. Il sut choisir la meilleure technologie disponible. Comme l'a dit Pierre Messmer, par ses investissements et le nombre d'ingénieurs et de scientifiques impliqués, le programme nucléaire historique d'EDF fut comparable au projet Apollo. Sous Marcel Boiteux, il n'y eut pas de dérapage financier. Il fut aidé en cela par ses capacités à choisir les hommes : il désigna un ingénieur de grande classe, Michel Hug, pour diriger les chantiers. Leur collaboration mena à une nouvelle stratégie industrielle nucléaire, adoptée aujourd'hui dans le monde entier. ■

L.T.

1. Maurice Allais reçut le prix de la Banque de Suède en sciences économiques (considéré comme l'équivalent du prix Nobel d'économie) en 1988 (NDLR).

aucun effet sur le coût d'acheminement. Elle ne diminuera pas le coût de la commercialisation, qui est minimum pour les entreprises à monopole qui n'ont ni à faire de publicité ni à démarcher le client. L'absence de concurrence permet même de faire des économies en confiant les ventes du gaz et de l'électricité à un même service commercial. L'instauration de la

concurrence obligea à les séparer. Cette opération, en France, amena une dépense supplémentaire « de trois milliards d'euros en trois ans » payée *in fine* par les clients.

Reste la production dont le coût essentiel provient des lourds investissements dans des centrales électriques qui doivent pouvoir fonctionner durant plusieurs

dizaines d'années : 60 ans pour le nucléaire le plus récent. Comment prévoir à si long terme l'état des marchés et de la technique ? La concurrence et ses signaux de prix sont incapables de guider l'investisseur vers les choix les plus rentables. Construire des centrales comporte de grands risques en concurrence. Cela effraie les actionnaires. Pour les rassurer, une solution simple pour une compagnie d'électricité est de ne pas produire et d'acheter l'électricité des autres sur le marché. Marcel Boiteux rappelle alors que s'ajouteront des « coûts de transaction » — qui « ont valu au professeur Ronald H. Coase son prix Nobel d'économie <sup>4</sup> ».

Aujourd'hui, des millions de consommateurs ont constaté que la concurrence n'avait pas diminué leurs factures. Un président de la Commission de régulation de l'énergie, Jean-François Carenco l'a confirmé, ainsi que des économistes comme Jacques Percebois.

Marcel Boiteux avait raison.

## La concurrence en électricité augmente les prix

Mais il ira plus loin. Il annoncera que non seulement la concurrence en électricité ne baisserait pas les prix, mais qu'elle les augmenterait. La concurrence exige le respect de règles dont l'importance est telle qu'elles figurent dans le traité de fonctionnement de l'Union européenne. Leur application fait

couramment grincer les dents. On parle alors des « ayatollahs de la concurrence de Bruxelles ». Si ces règles ne sont pas respectées, ou si elles ne peuvent pas l'être, la concurrence n'apportera pas les gains escomptés.

Les conditions imposées par la théorie économique pour que la concurrence fonctionne sont bien connues. Il faut que le marché soit ouvert, que l'information circule, que vendeurs et acheteurs puissent sereinement examiner la situation. Bref que la liberté de choix ait le temps de s'exercer en toute connaissance de cause. Ce que Boiteux résume par : « Il faut que se fixe librement sur le marché le prix pour lequel l'offre égale la demande. » Le fait que cela ne soit pas réalisé pour l'électricité est quelque peu subtil. Cela provient d'une spécificité bien curieuse de l'électricité : à chaque instant offre et demande doivent être égales. Au-delà d'un écart bien faible, Boiteux rappelle que la catastrophe survient, que le réseau électrique s'effondre : « les trains s'arrêtent, les ascenseurs tombent en panne... ». J'ajouterai qu'aujourd'hui le fonctionnement même de notre société numérique serait menacé. L'effondrement du réseau électrique de l'adversaire est devenu un but de guerre — on le voit concernant l'Ukraine.

Les responsables de l'équilibre des réseaux, les *dispatchers*, doivent pouvoir prendre des décisions à tout instant. Boiteux explique

---

4. Il reçut le prix de la Banque de Suède en sciences économiques en 1991 (NDLR).



© Vktollio / Shutterstock

qu'il n'est pas question pour eux « d'attendre que se fixe librement le prix sur le marché pour lequel l'offre égalera la demande [...] ce n'est donc pas le marché, mais un dictateur, le *dispatcher* » qui dans l'urgence « assure l'équilibre entre l'offre et la demande ». Les *dispatchers* ne peuvent pas compter, pour maintenir cette égalité, sur l'ensemble des moyens de production, mais seulement sur ceux, bien moins nombreux et souvent rares, qui s'annoncent disponibles à un instant donné. Ces derniers acquièrent alors d'un « pouvoir de marché » qui leur permet d'exiger et d'obtenir des prix élevés, voire quelquefois excessifs. Les prix de gros s'en trouvent artificiellement gonflés et, au final, les factures aussi. Comme le modèle historique permet, s'il est bien géré, de vendre à un prix coûtant bien bas, l'instauration de la concurrence augmentera les prix.

Marcel Boiteux fut encore moins suivi lorsqu'il annonça que non seulement la concurrence ne

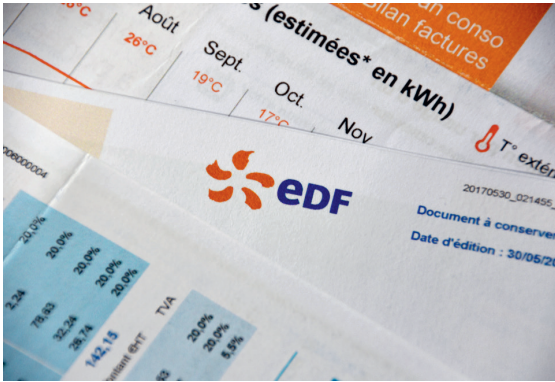
ferait pas baisser les prix, mais qu'en plus elle les augmenterait. Il avait bien saisi pourquoi certains énergéticiens se trompaient. Ces derniers considéraient, à tort, l'électricité comme un fluide banal, tel le gaz. Boiteux leur rappela dans *Futuribles* que « lorsque la pression de gaz bais-

sait ce n'était pas tragique », mais qu'un faible écart entre offre et demande en électricité causait l'effondrement du réseau électrique. Encore une fois, la réalité est venue trancher le débat.

### « Les études sur les conséquences de la dérégulation de l'électricité sont d'une rareté surprenante » (Harvard Business School)

En Europe, ce type d'études est même pratiquement inexistant. Les Américains se sont montrés un peu plus curieux. En juin 2023, la Harvard Business School a publié les résultats d'observations menées durant plusieurs années <sup>5</sup>. La concurrence conduit à des augmentations de prix principalement dues à des « imperfections du marché de l'électricité ». L'observation montre que beaucoup proviennent d'entreprises disposant de « pouvoirs de marché » qui font gonfler les factures. De

5. MACKAY Alexander et MERCADAL Ignacia, « Do Markets Reduce Prices? Evidence from the U.S. Electricity Sector », Harvard Business School, *Working Paper* 21-095, 19 juin 2023. URL : [https://www.hbs.edu/ris/Publication%20Files/21-095\\_5398d456-f1de-432d-9a0b-cc7a58b51145.pdf](https://www.hbs.edu/ris/Publication%20Files/21-095_5398d456-f1de-432d-9a0b-cc7a58b51145.pdf). Consulté le 23 novembre 2023.



© Gerard Bottino / Shutterstock

vérifier était une perte de temps. Une étude comparable à celle de la Harvard Business School est nécessaire en Europe. Son éclairage est indispensable avant toute réforme du marché. Il a toute chance de confirmer que la concurrence augmente les prix.

plus, les fournisseurs ont aussi tendance à ne pas produire mais à acheter l'électricité des autres sur le marché, d'où des coûts supplémentaires de transaction. L'analyse de Marcel Boiteux était exacte. Ces imperfections du marché peuvent-elles être corrigées ? Oui : en garantissant que le réseau électrique ne s'effondrera jamais, par exemple en stockant de l'électricité utilisable à tout instant. Mais le coût serait élevé. Une telle dépense a-t-elle un sens alors que nous savons que la concurrence ne fera pas baisser les prix par rapport au modèle historique bien géré ? « Cela vaut-il la peine d'un tel chambardement pour si peu ? », écrit Marcel Boiteux qui, une fois de plus, avait raison.

## Marcel Boiteux, un homme en avance sur son temps

Sous l'influence de la pensée économique dominante, celle de l'École de Chicago, il était admis que la concurrence ne pouvait qu'apporter des bienfaits. Cela paraissait tellement évident que le

Si la concurrence augmente les prix, elle fait échec à la bonne gestion d'un service public ou service d'intérêt économique général (SIEG) admis par la Commission européenne : celui qui vise à la fourniture d'électricité au prix le plus compétitif<sup>6</sup>. En ce cas, le traité de fonctionnement de l'Union européenne, par son article 106, prévoit des limites à l'application des règles de concurrence, sous réserve de préserver les échanges nécessaires à l'intérêt de l'Union. Limiter la concurrence ? Les conséquences seraient considérables. Cela permettrait à EDF de retrouver des fonctions perdues et de faciliter à l'État français la reprise de la maîtrise des prix de l'électricité comme le souhaite le président de la République. Mais attention à ne pas perturber les échanges (l'Allemagne y veillera !).

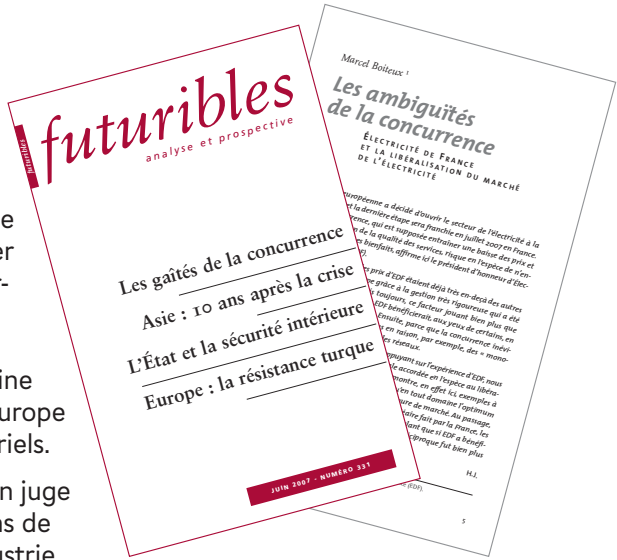
Marcel Boiteux terminait son article de 2007 de façon optimiste. La vérité finira par s'imposer et « il n'aura été qu'en avance sur son temps ». En attendant, il

6. Directive européenne n° 2019/944 du 5 juin 2019 concernant des règles communes pour le marché intérieur de l'électricité.

proposait un compromis. Comme aux États-Unis, il préconisait que chaque État de l'Union puisse choisir sa régulation de l'électricité, donc opter ou non pour la concurrence. Mais le secteur électrique américain fait l'objet d'une certaine condescendance en Europe — sauf chez les industriels.

C'est aux fruits que l'on juge l'arbre. Les prix moyens de l'électricité pour l'industrie dans l'Union européenne ne cessent de s'écarter des prix américains. Ils étaient devenus doubles en 2019. Avec les événements qui ont suivi, cela ne s'est pas arrangé. La concurrence n'est pas seule en cause, mais elle aggrave la situation à un bien mauvais moment. Des aides massives aux consommateurs, industriels ou non, ont été décidées. Il y en aura d'autres.

Jean Tirole, prix Nobel d'économie en 2014, a rappelé que Marcel Boiteux « avait changé la gestion de l'industrie électrique ». Ce dernier ne reçut pas



de prix Nobel, probablement car, comme chef d'entreprise, il gérait des intérêts particuliers. Mais Jean Tirole a tenu à ajouter qu'il fut président de la Société d'économétrie, fonction prestigieuse que les plus grands économistes ont occupée. Et chaque année cette Société n'a qu'un président, alors que le prix Nobel peut être partagé.

L'analyse et les prévisions de Marcel Boiteux, en 2007 dans *Futuribles*, étaient exactes, même le compromis proposé était judicieux. Il avait raison. ■

# LA PROSPECTIVE POUR LES TERRITOIRES

FORMATION FUTURIBLES INTERNATIONAL | 14-15 MARS 2024 | PARIS

## Intervenants

Animée par **Frédéric Weill**, directeur d'études à Futuribles spécialisé en prospective territoriale, et **Quentin Bisalli**, chargé d'études à Futuribles, avec l'intervention d'un grand témoin.

## Objectifs pédagogiques et compétences visées

Face aux mutations en cours sous l'effet notamment des transitions numérique et écologique, l'aptitude des acteurs locaux à se mobiliser autour de projets partagés est déterminante. La prospective territoriale constitue un puissant catalyseur de ces démarches collectives, en apportant des clefs de compréhension sur les dynamiques et les futurs possibles des territoires dans leur environnement, mais aussi en aidant les acteurs à converger vers une vision partagée, puis à se mobiliser autour de projets communs. L'objet de cette formation est double :

- Fournir des points de repère sur les différents types de démarches (exploratoire ou stratégique, en petit comité ou participative...) et donner des clefs de lecture pour juger de leur pertinence au regard des besoins du territoire.
- Familiariser les participants avec les méthodes et outils de la prospective territoriale au travers de temps collectifs de mise en pratique et de réflexion critique.

## Programme

- **Prospective et territoires : concepts et apports possibles**
- **Les approches et les processus**
- **Étape 1. Problématiser le sujet et cadrer la démarche**
- **Étape 2. Construire la base prospective**
- **Étape 3. Se projeter dans l'avenir**
- **Étape 4. De la prospective à la stratégie**
- **Retour d'expérience**
- **Jeu sérieux : concevez votre démarche de prospective territoriale !**

## 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/la-prospective-pour-les-territoires-3/> 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](mailto: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).*

# L'Europe est-elle fragile ?

Par Jean-François Drevet <sup>1</sup>

*Percutée de l'extérieur par le retour des conflits sur le sol européen (Ukraine / Russie), mais aussi à l'extérieur, de l'autre côté de la Méditerranée (Israël / Gaza), l'Union européenne connaît, fin 2023, à quelques mois de ses prochaines élections parlementaires, une situation inédite depuis plus de 30 ans et la fin de la guerre froide. Bâtie par une politique des petits pas, largement focalisée sur la sphère économique et commerciale (qui a produit de bons résultats jusqu'ici), elle peine à changer de dimension et à développer des politiques communes dans les domaines dans lesquels les États membres ont à cœur de conserver leur souveraineté (migrations, monnaie, fiscalité...). Qui plus est, les élargissements successifs ayant porté le nombre de ses membres à 27, les modalités de décision, en particulier au Conseil, font qu'il est devenu très compliqué de parvenir à des accords.*

*Cette situation fragilise-t-elle l'Union et dans quelle mesure ? Serait-elle en bout de course en termes d'intégration économique et politique ? Dans cette chronique, Jean-François Drevet examine les fragilités de l'Union dans cinq domaines clefs : le Marché unique, la politique budgétaire, la politique migratoire, la monnaie unique et la politique étrangère commune. Le bilan « est mitigé » comme il l'écrit en conclusion, mais le contexte extrêmement turbulent dans lequel évoluent désormais les Européens exige une (re)montée en puissance de l'action communautaire et une affirmation plus claire de leur appartenance à une entité commune. S.D.*

Les médias mettent souvent l'accent sur le spectacle de la désunion donné par les interventions des États membres au Conseil européen : après avoir fait preuve d'une assez grande

unité lors de l'agression russe en Ukraine, celui-ci s'est divisé au sujet de la guerre à Gaza <sup>2</sup>. Dans une Union à 27, avec un nombre croissant de sujets traités, au-delà du jeu des négociations, y

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

2. Comme en témoignent les votes des 27 à l'Assemblée générale des Nations unies du 27 octobre 2023 : huit en faveur d'une trêve humanitaire à Gaza, quatre « contre » et 15 abstentions.

aurait-il des questions de fond où l'absence de solution conduirait à l'impuissance, sinon à l'éclatement ?

Compte tenu de l'importance des problèmes, nous ne pouvons qu'apporter des réponses partielles, que nous limiterons à cinq sujets clefs, où l'action européenne est inégalement fragile : la gestion du Marché unique, les controverses budgétaires, le contrôle de l'immigration illégale, la monnaie unique et la politique étrangère.

## Robustesse du Marché unique

Trente années ont créé une réglementation abondante qui assure, à travers quelques dizaines de milliers de pages du *Journal officiel de l'Union européenne*, la gestion d'un ensemble de 450 millions d'habitants. Non seulement le Marché unique européen fonctionne, mais ses normes sont mises en œuvre au-delà des limites de l'Union, par la Norvège et l'Islande. Selon Anu Bradford<sup>3</sup>, elles sont souvent reprises dans d'autres parties du monde et pas seulement pour les besoins de l'exportation vers le marché européen.

S'il y avait des doutes sur sa pérennité, ils ont été dissipés par la cohésion manifestée par tous les États membres lors de la négociation du Brexit. Les Britanniques, qui croyaient profiter des divisions internes de l'Union européenne (UE) pour faire du *cherry picking*

(i.e. ne prendre que ce qui leur était le plus favorable), ont mesuré à leurs dépens la robustesse du cadre juridique européen.

Cependant, l'avenir de l'UE continue de faire l'objet de discussions parfois difficiles. Pour les pays du Nord, qui ont obtenu ce qu'ils voulaient de la construction communautaire, il ne faut pas l'étendre à des mesures d'harmonisation fiscale ou sociale. En revanche, les pays du Sud et de l'Est, qui ont encore des problèmes de mise en œuvre, reprochent à leurs partenaires de ne pas avoir assez conscience de l'effort qu'ils ont dû consentir pour s'y adapter.

En généralisant le vote à la majorité qualifiée, l'Acte unique a installé un mode de régulation qui contraint les États membres à surmonter leurs divergences. Ensuite, les décisions prises avec le concours du Parlement sont appliquées par la Commission européenne, le cas échéant après des arrêts de la cour de justice de Luxembourg. En dépit de sa complexité, le Marché unique fonctionne et ne serait pas facile à détricoter.

## Persistance des controverses budgétaires

Le « *I want my money back* [Je veux récupérer mon argent] » de Margaret Thatcher est resté une obsession générale. Les versements effectués au titre des politiques communes sont examinés

3. BRADFORD Anu, *The Brussels Effect: How the European Union Rules the World*, Oxford : Oxford University Press, 2020. Voir DREVET Jean-François, « L'«effet Bruxelles», une stratégie d'influence ? », *Futuribles*, n° 437, juillet-août 2020, p. 111-117.

à la loupe par les États membres, notamment quand ils craignent de devenir contributeurs nets. Dans le contexte de croissance des dépenses, qui découle des crises (la Covid, l'Ukraine, la lutte contre le changement climatique), les débats sont de plus en plus animés.

Le groupe des « frugaux » (les Nordiques, les Pays-Bas, l'Irlande <sup>4</sup>) refuse d'abandonner le plafond de contribution de 1 % du produit intérieur brut (PIB), qui bloque la progression du budget communautaire. Moins avancées, les « cigales » du Sud (et de l'Est) veulent continuer à bénéficier d'un solde budgétaire positif et comptent sur des politiques nouvelles pour l'améliorer, au-delà des allocations qu'elles reçoivent déjà de la politique agricole commune (PAC) et des fonds structurels.

Un éventuel renouvellement du Plan de relance <sup>5</sup> qui a porté la dépense à environ 4 % du PIB et ouvert la voie à des emprunts ne va pas de soi, pas plus qu'un accroissement massif des ressources propres (les taxes qui parviennent directement au budget communautaire), pour assurer le remboursement des emprunts à partir de 2027.

En voulant distribuer à leur convenance les fonds importants dont ils sont bénéficiaires, la Hongrie

et la Pologne (avant la défaite des conservateurs aux élections d'octobre 2023) ont contraint l'UE à agir pour assurer le respect de l'état de droit et à mettre en pratique la « conditionnalité » prévue par les textes. Ils ont été ainsi privés d'importants versements, notamment d'une partie du Plan de relance.

Néanmoins, bien que la négociation du budget européen soit toujours un parcours difficile, elle est efficace, puisque les États membres sont toujours parvenus à un accord. Le fait qu'il soit multi-annuel introduit des rigidités mais épargne à l'UE les querelles interminables qui découlaient autrefois de l'annualité budgétaire. Par rapport aux débats acharnés qui entourent le recours à l'article 49.3 de la Constitution en France et le *shutdown* aux États-Unis <sup>6</sup>, ce n'est pas si mal, en attendant qu'il soit possible à l'UE de disposer d'un budget à la hauteur de ses responsabilités.

## Confusion dans le débat sur les questions migratoires

Après le grand élargissement de 2004-2007, l'intensification des migrations internes à l'UE s'est déroulée sans conflit majeur.

4. Un pays devenu riche ou plutôt, comme le disait Coluche à son sujet, un « ancien pauvre » qui a longtemps bénéficié des politiques communes, mais qui conserve sa fiscalité attractive et le moins-disant social qui attirent les multinationales.

5. Voir VIELLEDENT Catherine et DREVET Jean-François, « Le Plan de relance européen, une percée historique. On ne peut vivre durablement en dessous de ses moyens », *Futuribles*, n° 441, mars-avril 2021, p. 85-94.

6. L'article 49.3 permet de faire adopter un projet de loi sans vote de l'Assemblée nationale, en engageant la responsabilité du gouvernement ; et le *shutdown* désigne la fermeture des services de l'État américain, faute d'accord parlementaire sur le budget (NDLR).

Les Européens ont aussi fait bon accueil aux réfugiés ukrainiens qui affluent depuis 2022. Il n'en va pas de même avec les arrivées en provenance d'autres pays tiers. Dans le contexte d'une multiplication des pénuries de main-d'œuvre, pourquoi l'émergence d'une politique commune rencontre-t-elle autant de difficultés ?

D'une part, depuis l'abolition des contrôles aux frontières internes de l'UE qui remonte à 1985, on a sous-estimé les problèmes de gestion des migrants. Face à l'accroissement des arrivées illégales et à l'inflation des demandes d'asile, la réponse réglementaire est inadaptée. À Maastricht, les États membres avaient refusé la création d'une politique commune, puis ils ont résisté à son développement quand elle est devenue inévitable. Le règlement de Dublin, qui rend les pays de première entrée responsables de l'enregistrement des migrants, n'est pas un instrument de politique commune. Et la convention de Genève sur le droit d'asile, adoptée en 1950 dans le contexte de la guerre froide, visait des populations bien moins nombreuses qu'aujourd'hui.

D'autre part, l'opinion fait un lien entre les migrations et les difficultés d'intégration d'une partie des populations déjà installées. Les provocations d'un petit groupe d'islamistes radicalisés, la persis-



© Photo Veterok / Shutterstock

tance de la menace djihadiste<sup>7</sup> ont un impact important sur les comportements électoraux, dont les gouvernements sont obligés de tenir compte. Le réservoir migratoire externe comptant une majorité de personnes originaires de pays musulmans, réputées perméables à l'intégrisme, la tendance est à multiplier les mesures restrictives concernant les visas, le regroupement familial et les demandeurs d'asile.

Au lieu d'accepter de développer une politique commune, les États membres se replient sur leurs frontières et renvoient les migrants illégaux chez leurs voisins. Confrontés à l'hostilité de certains pays musulmans, les Nordiques regrettent leur générosité passée dans l'accueil des demandeurs d'asile<sup>8</sup>. Ils ont fortement durci leurs politiques pour tenir compte des réserves croissantes de l'opinion. Les pays d'Europe du Sud n'en peuvent plus d'accueillir les nouveaux « *boat people* » en Méditerranée. Dans l'impossibilité de verrouiller leurs frontières ma-

7. Voir l'interview d'Hugo Micheron dans *Le Monde* du 9 novembre 2023, p. 30.

8. Le Danemark, à la suite de la controverse sur les caricatures de Mahomet ; la Suède, du fait de la dégradation de la sécurité dans ses banlieues et en raison des pressions exercées par la Turquie dans le contexte de son adhésion à l'OTAN (Organisation du traité de l'Atlantique Nord). Moins exposée, la Finlande partage les mêmes préoccupations.

ritimes, ils subissent les inconvénients du règlement de Dublin. Ils réclament une politique plus ferme de l'UE sans l'obtenir, ce qui les incite parfois à tricher avec les règles (non-enregistrement des migrants, refoulements). Quant à ceux d'Europe centrale, ils ont fermement refusé les quotas de répartition des demandeurs d'asile proposés par la Commission, en accusant leurs voisins de l'Ouest de vouloir leur imposer des problèmes qu'ils n'arrivent pas à gérer chez eux.

Entre les visions extrêmes de l'« Europe passoire » et de l'« Europe forteresse », la confusion est profonde <sup>9</sup>, avec un risque évident de segmentation de l'espace Schengen et de remise en cause de l'acquis juridique de la Cour européenne des droits de l'homme (CEDH). En France comme ailleurs, le faible taux des expulsions décrédibilise les politiques migratoires nationales ainsi que celle de l'Union, avec un coût politique de plus en plus élevé.

En fait, les divergences ne sont pas si profondes, puisque tous les pays veulent la régulation des migrations. Mais la mise en œuvre d'une politique efficace prend du temps, alors que les pressions augmentent aux frontières

externes de l'UE, sans compter de nouvelles tentatives de chantage, comme la Turquie et la Biélorussie en ont donné l'exemple.

## Fragilité de la monnaie unique

La mise en commun des souverainetés nationales a créé une monnaie unique, qui implique d'assez fortes contraintes dans la gestion de la dette de tous les pays participants. En conséquence, ont été adoptés les célèbres critères de Maastricht. Mais la montée des crises a incité les États membres à fortement accroître leur endettement. La gestion de la monnaie étant une chose trop sérieuse pour être confiée aux politiques <sup>10</sup>, elle est de la compétence d'une banque centrale indépendante, ce qui n'est pas une particularité de l'UE. Bien que sa priorité soit de lutter contre l'inflation, la Banque centrale européenne (BCE) a pris les mesures nécessaires pour combattre les crises, montrant que cette indépendance n'était pas un vain mot.

Entre ceux qui n'ont pas voulu y entrer lors de sa création (le Danemark et la Suède) et ceux qui n'en remplissent pas encore tous les critères (la Pologne, la République tchèque, la Hongrie,

9. Roberta Metsola, présidente du Parlement européen, à la fondation Konrad Adenauer le 6 novembre 2023 : « L'immigration est un domaine dans lequel nous avons vu trop peu de progrès au cours des 10 dernières années ». Citée in ALIPOUR Nick, « L'UE doit reconnaître ses échecs en matière de migration, selon Roberta Metsola », *Euractiv*, 10 novembre 2023. URL : <https://www.euractiv.fr/section/politique/news/lue-doit-reconnaitre-ses-echecs-en-matiere-de-migration-selon-roberta-metsola/>. Consulté le 16 novembre 2023.

10. Comme l'a montré l'exemple de la Révolution française : initialement, les émissions d'assignats, gagées sur la vente des biens nationaux, ne devaient pas dépasser 400 millions de livres ; en 1795, suite à des années de lyrisme de la planche à billets, un total de 35 milliards était en circulation. En 1797, le Directoire a dû se résoudre à une banqueroute des deux tiers, pudiquement présentée comme un « tiers consolidé ».

la Roumanie et la Bulgarie), la zone euro ne fait pas l'unanimité. Les Baltes l'ont rejointe après une évolution difficile et la Grèce s'y est maintenue dans la douleur.

Après deux décennies d'union économique et monétaire (UEM), l'avenir des critères de Maastricht est problématique. Si les frugaux veulent qu'on y revienne, les Méditerranéens <sup>11</sup>, vulnérables aux chocs asymétriques, craignent la police budgétaire de l'Euro-groupe. Trop d'États membres sont maintenant très endettés, ce qui ferait du retour aux critères une punition collective <sup>12</sup>.

S'il est difficile d'entrer dans l'Eurozone, il est encore plus difficile d'en sortir. Ceux qui ont prédit son explosion se sont lourdement trompés. Même les partis politiques les plus hostiles à l'UE ont fini par le comprendre. Bien que l'UEM soit nettement plus monétaire qu'économique et qu'il soit compliqué de la rééquilibrer, elle paraît destinée à durer, faute d'alternative, en espérant (voir plus haut) qu'elle puisse disposer d'un budget macroéconomiquement crédible, afin de réduire sa vulnérabilité.

## Une politique étrangère velléitaire ?

Elle apparaît déjà comme un terrain privilégié de désaccords. Face au conflit israélo-palestinien

qui ne touche directement aucun État membre, la cacophonie est totale et s'est même propagée jusqu'au cœur des institutions européennes.

À l'exception de bons résultats dans l'action humanitaire, face à la déstabilisation croissante des périphéries européennes, le bilan n'est pas rassurant. Depuis le début des années 2000, faute de consensus en faveur d'actions énergiques, la diplomatie européenne s'est alignée sur la politique pro-business d'Angela Merkel <sup>13</sup>. La promotion des valeurs européennes tourne à l'inflation déclaratoire, pendant que les autocrates multiplient les agressions. Abusivement qualifiés de « gelés », les conflits en Méditerranée et dans l'ex-URSS se sont dangereusement réchauffés. Depuis longtemps nécessaire, une autre politique ne parvient pas à émerger.

Du fait de leur taille ou de leur passé (leur indépendance est récente ou elle leur avait été confisquée pendant la guerre froide), un assez grand nombre d'États membres focalisent leur politique étrangère sur leurs relations de voisinage, aujourd'hui inscrites en grande partie dans le cadre communautaire. Pour traiter des questions globales, ils ont des opinions mais pas nécessairement d'expérience. Quant aux grands pays qui possèdent un réseau di-

11. Qu'une certaine presse a surnommés le « club Med » ou les PIGS (Portugal, Italy, Greece, Spain ; pigs signifiant aussi « cochons » en anglais).

12. Après avoir fait preuve de créativité statistique pour rentrer dans l'UEM, la Grèce a été soumise à une très forte cure d'austérité.

13. DREVET Jean-François, « Les Européens orphelins d'Angela Merkel ? », *Futuribles*, n° 447, mars-avril 2022, p. 95-101.



Conseil européen, table ronde / affaires générales, Bruxelles, novembre 2023 © UE

plomatique mondial et un personnel expérimenté, ils n'entendent pas se laisser déposséder par la montée en puissance d'une authentique politique commune.

Il n'est donc pas surprenant que les controverses dominent les débats. Au Conseil européen, chaque pays défend ce qu'il croit être son intérêt national. Sans parler des pressions externes, auxquelles certains gouvernements ne sont pas insensibles, des divergences fondamentales sont nombreuses en raison de la géographie et de l'Histoire. Ce serait probablement aussi le cas à Washington si la politique étrangère américaine était négociée par les États, avec obligation de décider à l'unanimité.

Il est donc difficile de faire prévaloir l'intérêt général européen, d'autant plus qu'il y a carence, autant dans la conception des politiques que dans le processus de décision. Bien que l'invasion de l'Ukraine entraîne une prise de conscience, celle-ci n'est encore ni suffisamment générale<sup>14</sup> ni

assez ferme pour inquiéter les auteurs de troubles d'Ankara et de Moscou. En préconisant de décider à la majorité qualifiée, le chancelier allemand a montré la voie à suivre, mais pour renoncer à l'unanimité, il faut l'unanimité !

## Un bilan mitigé

L'Union européenne est d'abord une construction économique. C'est pourquoi elle est parvenue à construire un marché opérationnel et elle s'est donné les moyens de le faire fonctionner. Dans cette entreprise, les gouvernements nationaux ont accordé aux institutions communautaires une assez grande marge d'action et se plient à la règle de la majorité qualifiée. Comme d'autres institutions internationales, il est inévitable que l'Union ait un budget et qu'elle dispose des moyens nécessaires pour le faire approuver et le gérer, et qu'elle y parvienne aussi bien, voire parfois mieux, que certains États membres.

Il est plus difficile d'obtenir ce résultat quand la construction des politiques communes touche au cœur des souverainetés nationales, ce qui est le cas des questions migratoires et de l'Union monétaire. C'est pourquoi leur gestion, initiée par deux « piliers » du traité de Maastricht, met tant de temps à basculer dans la

14. Dans une Union à 27 États membres, la probabilité qu'au moins l'un d'entre eux use et abuse de son droit de veto est élevée. C'est actuellement le cas de la Hongrie. Dans les négociations d'adhésion, où tout se décide à l'unanimité, les exemples ne manquent pas.

sphère communautaire. La pression de l'opinion en faveur de la régulation des migrations et de la consolidation de l'euro sera-t-elle suffisante pour avancer ?

Enfin, le souci principal est l'avenir de la politique étrangère et de sécurité, ou de ce qui en tient lieu, parce qu'elle est toujours très en deçà des besoins. La construction européenne étant un processus interne, il n'est pas surprenant qu'elle rencontre des difficultés dans le développe-

ment de ses politiques externes. Aussi longtemps que le navire européen avançait par beau temps, ce n'était pas trop grave. Or il se trouve maintenant dans une tempête qui pourrait bien s'aggraver. En dépit de quelques signes encourageants et à moins que la peur de Vladimir Poutine, qui s'est montré, un peu malgré lui, un excellent sergent recruteur pour l'OTAN, ne réveille le Conseil européen, combien de temps faudra-t-il à l'UE pour se doter d'une politique efficace ? ■

## SESSIONS DE FORMATION FUTURIBLES

### **Le design fiction et la narration au service de la prospective**

*Animée par Pierre-Antoine Marti, directeur d'études à Futuribles, et Antoine Le Bec, chargé d'études à Futuribles, avec la participation d'un grand témoin*

Vendredi 19 janvier 2024 • Prix : 1116 euros TTC\*

### **Pratiques de la prospective stratégique**

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

Judi 25 et vendredi 26 janvier 2024 • Prix : 1716 euros TTC\*

### **Atelier de construction de scénarios prospectifs**

*Animée par Cécile Désaunay, directrice d'études à Futuribles, Marie Ségur, directrice d'études à Futuribles, et Antoine Le Bec, chargé d'études à Futuribles*

Judi 1<sup>er</sup> et vendredi 2 février 2024 • Prix : 1716 euros TTC\*

### **La prospective pour les territoires**

*Animée par Frédéric Weill, directeur d'études à Futuribles, et Quentin Bisalli, chargé d'études à Futuribles*

Judi 14 et vendredi 15 mars 2024 • Prix : 1716 euros TTC\*

### **La veille et l'analyse prospective**

*Animée par Cécile Désaunay, directrice d'études à Futuribles, avec la participation François de Jouvenel et Jérôme Bondu*

Judi 28 et vendredi 29 mars 2024 • Prix : 1716 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](mailto: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/>

## Idées & faits porteurs d'avenir\*

### Ce que révèle le prix du Big Mac sur l'inflation

Morgan Paglia

Que peuvent bien raconter deux rondelles de 45 grammes de viande hachée, de cheddar et de « sauce spéciale » sur l'évolution des prix à l'échelle mondiale ? Selon le magazine *The Economist*<sup>1</sup>, les écarts de prix du burger montrent comment l'inflation a modifié la quantité de biens et de services que les monnaies peuvent acheter. Les dernières mesures publiées fin août 2023 indiquent d'importantes disparités à l'échelle mondiale.

### Une détérioration du pouvoir d'achat à géométrie variable

Bien qu'il ne soit pas destiné à être une mesure précise du flottement des monnaies, l'indice Big Mac (créé en 1986) est aujourd'hui largement reconnu, y compris dans les travaux académiques. Le raisonnement sous-jacent est simple, la « burgeronomie » — c'est-à-dire la quantité de ressources et le temps de travail

nécessaire à la confection du Big Mac de McDonald's — étant la même à travers le monde, si le prix du Big Mac augmente dans un pays, la monnaie de ce pays ne permet plus d'en acheter autant, sa valeur réelle a donc baissé ; et inversement. En juillet 2023, le prix du Big Mac était de 5,58 dollars US aux États-Unis, en augmentation de plus de 4 % par rapport à janvier (8,3 % sur un an). Il s'agit du taux de « Mcflation » le plus élevé enregistré dans l'indice depuis 2012, ce qui suggère la persistance de l'inflation dans le pays, à tout le moins sur les produits alimentaires.

Par rapport au reste du monde, cependant, les Américains s'en sont tirés à bon compte. De janvier à juillet, le prix d'un Big Mac a augmenté plus de deux fois plus vite dans la zone euro et en Grande-Bretagne, et près de quatre fois plus vite au Canada. Qu'est-ce que cela signifie ? En clair, que le pouvoir d'achat de ces monnaies baisse plus vite que celui du dollar US. Si l'on admet que cette mesure puisse être le reflet d'une tendance macro-économique de plus grande envergure, cet écart entre la monnaie de référence et les autres pourrait avoir plusieurs conséquences.

1. « Our Big Mac Index Shows How Burger Prices Are Changing », *The Economist*, 3 août 2023. URL : <https://www.economist.com/big-mac-index>. Consulté le 24 novembre 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).

## Une inflation durable ?

À défaut de restaurer la compétitivité de leur monnaie — par des hausses de taux directeurs, par exemple — certains pays devront payer plus cher leurs importations. C'est notamment le cas du Japon dont la monnaie a perdu 13 % de sa valeur depuis le début de l'année <sup>2</sup>. Le passage du yen en dessous du seuil psychologique de 150 yens par dollar US, jusqu'ici considéré comme indépassable par la Banque du Japon, expose l'économie nipponne — qui importe 90 % de son énergie et la majeure partie de ses denrées alimentaires — à de fortes hausses de coûts dans les prochains mois. Et la sortie de la spirale inflationniste sera obérée par l'endettement abyssal de Tokyo : 266 % de son produit intérieur brut début 2023 <sup>3</sup>. Le problème est que ce surendettement, comparable à celui de nombreux pays dans le monde, est de nature à limiter les marges de manœuvre de la banque centrale qui ne peut apporter que des corrections marginales — et / ou temporaires — sous peine de créer une crise de la dette.

Ainsi, malgré un resserrement monétaire sans précédent en 50 ans, tant aux États-Unis qu'en Europe, il est difficile de savoir si ces me-

sures seront suffisantes pour « refroidir » l'économie et atteindre — puis tenir durablement — l'objectif d'une inflation à 2 %. Les dettes élevées conjuguées aux perturbations des chaînes d'approvisionnement mondiales et aux dépenses inévitables liées à la défense, au climat et au vieillissement de la population, pourraient suggérer que nous nous orientons vers un nouvel équilibre. Il est possible que les banquiers centraux, bien qu'affichant leurs objectifs inflationnistes, puissent manifester une certaine hésitation à adopter des politiques suffisamment rigoureuses pour les atteindre. De là à envisager, comme *The Economist* <sup>4</sup>, que le taux de 4 % d'inflation devienne la nouvelle norme et remplace les 2 % ? Cette hypothèse s'appuie désormais sur quelques solides arguments. ■

---

4. « Inflation Is as Corrosive to Investing as It Is to the Real Economy », *The Economist*, 21 juin 2023. URL : <https://www.economist.com/briefing/2023/t-is-to-the-real-economy>. Consulté le 24 novembre 2023.

---

## L'exploitation minière des fonds marins sur la sellette

*Pierre Papon*

L'exploration, dans les années 1980-1990, des grands fonds marins — d'une profondeur de 4 000 à 6 000 mètres (m) — par des sous-marins océanographiques a mis en évidence des gisements de métaux au fond des océans Pacifique et Indien. Leur exploitation, sur des zones qui peuvent atteindre des centaines de kilo-

---

2. WESTBROOK Tom, « Yen Comeback May Be a Longer Waiting Game », Reuters, 27 octobre 2023. URL : <https://www.reuters.com/markets/currencies/yen-comeback-may-be-longer-waiting-game-2023-10-27/>. Consulté le 24 novembre 2023.

3. ORGAZ Cristina J., « Économie : pourquoi le Japon est le pays le plus endetté du monde (et pourquoi on continue à lui prêter de l'argent) », *BBC News / Afrique*, 22 janvier 2023. URL : <https://www.bbc.com/afrique/monde-64319548>. Consulté le 24 novembre 2023.

mètres carrés (km<sup>2</sup>) est difficile, mais revient périodiquement à l'ordre du jour car certains de ces métaux, tels que le cuivre, le manganèse, le cobalt et des terres rares, jouent un grand rôle dans la transition énergétique.

### Un possible eldorado sous-marin

Il existe trois types de ressources : les nodules polymétalliques, les encroûtements et les sulfures hydrothermaux :

- Les premiers ont la forme de petites boules grises d'un décimètre de diamètre composées de couches d'hydroxyde de fer et de manganèse, avec des insertions à faible concentration de cuivre, de zinc et parfois de terres rares. D'origine probablement bactérienne, on les trouve dans des plaines abyssales, entre 3 000 et 5 500 m de profondeur.
- Les encroûtements sont des couches métalliques d'oxydes de fer et de manganèse, avec des insertions de cobalt, de platine, de titane, de vanadium et de zirconium. Ils sont situés entre 400 et 4 000 m de profondeur, notamment en Polynésie, parfois au voisinage de volcans sous-marins.
- Enfin, les sulfures métalliques hydrothermaux, avec du cuivre, du zinc, du plomb et, parfois, des métaux précieux (argent et or), se trouvent au voisinage des sources hydrothermales — appelées aussi « fumeurs noirs », des sources d'eau chaude dans lesquelles ont été dissous les sulfures — sur les dorsales océaniques. Ce seraient les ressources les plus prometteuses.

Un rapport d'information du Sénat sur les fonds marins, publié en 2022, citant des données du CNRS (Centre national de la recherche scientifique) et de l'Ifremer (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer), estime (de façon optimiste ?) que dans la zone Clarion-Clipperton, dans le Pacifique, les ressources exploitables de nodules s'élevaient à 34 milliards de tonnes de métaux différents<sup>1</sup> ! Ces gisements seraient riches en fer (13 %) et surtout en manganèse (26 %), ainsi qu'en nickel (1,2 %), en cuivre (1,1 %) et en cobalt, et pour certains en terres rares à très faible concentration. Ils représenteraient 6 000 fois plus de thallium, trois fois plus de cobalt, et plus de manganèse et de nickel que toutes les ressources avérées des gisements terrestres.

### Course à l'exploitation minière et encadrement juridique

Cet eldorado potentiel suscite des convoitises de la part de compagnies minières qui souhaitent l'exploiter. Or, une telle exploitation est soumise à une réglementation internationale stricte, supervisée par l'Autorité internationale des fonds marins dont le siège est à Kingston, en Jamaïque. Créée en 1994, sous l'égide de l'Organisation des Nations unies en application de sa Convention sur le droit de la mer, signée en 1982, elle a

1. CANÉVET Michel et ROHFRIETSCH Teva, *L'Exploration, la protection et l'exploitation des fonds marins : quelle stratégie pour la France ?*, Paris : Sénat, rapport n° 724, 2022. URL : <https://www.senat.fr/rap/r21-724/r21-7241.pdf>. Consulté le 27 novembre 2023.

la mission d'éviter les conflits et de contrôler les activités d'exploitation minière des fonds marins dans les eaux internationales en dehors des ZEE (zones économiques exclusives). Elle doit en principe délivrer des permis d'exploration puis d'exploitation<sup>2</sup>. Aucun pays n'a obtenu jusqu'à présent de permis d'exploitation mais plusieurs, dont la France, ont obtenu des permis d'exploration — permis attribués à l'Ifremer en 2001 dans la zone de Clarion-Clipperton dans le Pacifique oriental proche de l'Amérique centrale<sup>3</sup>. Des ressources seraient peut-être exploitables dans les ZEE de Wallis-et-Futuna, de la Nouvelle-Calédonie, de la Polynésie et de La Réunion.

Une conférence internationale a été organisée à Kingston en juillet 2023, afin d'aboutir à un « code minier » précisant les modalités d'exploitation des fonds marins. Les États n'ont pas réussi à trouver un accord mais ont établi une feuille de route pour y parvenir d'ici 2025.

---

2. La ZEE d'un pays s'étend à 200 milles marins (370 kilomètres) de son rivage. Dans celle-ci, il a un droit d'exploitation exclusif des ressources de la mer (pêche, ressources minérales, etc.). La France a une ZEE très importante de 11 millions de km<sup>2</sup>, essentiellement dans ses départements, régions et territoires d'outre-mer.

3. L'île de Clipperton, inhabitée, est située à 1 100 km du Mexique. Elle est sous souveraineté française depuis 1858, mais le Mexique l'a contestée et a occupé l'île par une garnison comprenant femmes et enfants qui ont été abandonnés sans ravitaillement pendant la Première Guerre mondiale. Seules des femmes et des enfants ont subsisté sous la férule d'un officier autocrate qui les a exploités et qu'ils ont assassiné à coups de marteau. Les survivants ont été sauvés par un navire américain en 1917. Un arbitrage international rendu par le roi Victor-Emmanuel III d'Italie, en 1931, a reconnu la souveraineté française.

L'Autorité est soumise à une double pression. D'une part celle de quelques États, notamment le Nauru, un État insulaire du Pacifique de 21 km<sup>2</sup> et 12 000 habitants, qui a un projet d'exploitation avec l'entreprise canadienne Nauru Ocean Resources, et qui a invoqué une obscure clause du traité. Celle-ci obligerait l'Autorité à mettre en place les modalités d'exploitation dans un délai de deux ans après le dépôt d'une demande par un État, ce que Nauru avait fait en 2021, sinon elle devrait lui accorder un permis provisoire, mais aucun n'a été délivré. D'autre part, celle d'une « coalition pour la protection des grands fonds marins », regroupant une vingtaine de pays, dans laquelle la France joue un rôle actif avec le Chili, le Costa Rica, le Vanuatu, appuyés par quelques pays industriels et Fidji, un État insulaire actif. Elle milite pour un moratoire de l'exploitation, mais fait face à l'opposition de la Chine, du Mexique, de Nauru, de l'Inde et de la Russie qui ont des objectifs industriels pour certains et financiers pour d'autres — une rente minière.

L'argument essentiel des partisans du moratoire — il n'a pas été décidé — est que l'exploitation à grande échelle des fonds marins causera très probablement des dégâts environnementaux importants qui auront des répercussions sur de nombreuses espèces vivantes des grands fonds, alors que l'on connaît mal l'état de leur biodiversité<sup>4</sup>. Les Japonais avaient

---

4. STOKSTAD Erik, « As Prospect of Unregulated Deep-sea Mining Looms, Scientists Sound the

testé, en 2020, un robot pour exploiter un gisement de cobalt sur un monticule sous-marin, le Takuyo-Daigo à 1 900 km au sud-est de Tokyo, et ils ont constaté, deux ans après cet essai, que dans la zone explorée la population de plusieurs espèces de poissons avait diminué de moitié, et de 56 % à 150 m de cette zone. De nombreuses organisations non gouvernementales, des organisations de pêcheurs et de recherche s'intéressant à la biodiversité et à l'environnement soutiennent l'idée d'un moratoire, voire d'un abandon pur et simple de l'exploitation minière des grands fonds.

Une nouvelle réunion sera sans doute organisée par l'Autorité en 2024 pour tenter de parvenir à un accord, mais l'idée de moratoire reste dans le brouillard. On doit s'interroger toutefois sur le réalisme de l'exploitation des ressources minières océaniques. On a réalisé au maximum seulement 20 % de la cartographie des fonds marins, avec une résolution insuffisante, il est donc difficile d'avoir une estimation réaliste des ressources. Leur exploitation par grande profondeur nécessitera l'utilisation d'un robot qui aspirera par exemple les nodules polymétalliques, en balayant le fond des océans ; ils seront remontés par un tuyau sur une plate-forme flottante à positionnement dynamique — elle doit rester à la verticale de la zone exploitée

guidée par un GPS — ; les nodules débarrassés de leur boue seront ensuite transbordés sur un navire qui les transportera dans une usine de traitement.

Le balayage du fond par des robots fera très probablement des dégâts, ainsi que les boues qui seront rejetées en mer. L'exploitation des ressources minières des fonds marins est souvent présentée comme « la » solution idéale pour résoudre le problème de l'approvisionnement en métaux des filières électriques du futur, mais elle doit faire face à de fortes oppositions. Confronté à de vives critiques de la part des défenseurs de l'environnement marin (les pêcheurs notamment) et à de nombreux aléas technico-économiques — l'estimation des coûts d'exploitation et celle des ressources sont très incertaines —, ce projet futuriste risque fort de rester un mirage... ■

---

## Chine / États-Unis : fin et leçons de la guerre des puces

Édouard Valensi

Il n'a fallu que quatre ans après le prononcé des sanctions informatiques infligées à la Chine par Donald Trump pour que Huawei annonce la mise sur le marché de son portable haut de gamme 5G en technologie 7 nm (nanomètres) et qu'Apple et son iPhone 15 vedette se voient écartés du marché chinois. Quatre ans pour que l'administration américaine

---

Alarm », *Science*, vol. 381, n° 6655, 18 juillet 2023, p. 254. URL : <https://www.science.org/content/article/prospect-unregulated-deep-sea-mining-looms-scientists-sound-alarm>. Consulté le 27 novembre 2023.

capitule et laisse le champ libre à une industrie informatique chinoise en plein essor et qui pourrait rattraper l'industrie américaine dès 2025.

### Faits et enjeux concernés

Le 8 septembre 2023, Huawei a pris les États-Unis par surprise en annonçant la mise sur le marché du téléphone portable Mate 60 Pro dont les puces en technologie 7 nm prennent en charge la 5G. Fabriquées par une entreprise chinoise, la SMIC (Semiconductor Manufacturing International Corporation), les puces qui équipent ces téléphones n'accusent guère plus de cinq ans de retard sur les puces les plus avancées du marché <sup>1</sup>.

Ceci remet en cause la crédibilité des sanctions américaines face à la Chine et indique le prix à payer pour l'échec des sanctions sur les semi-conducteurs, à savoir : une percée irrésistible de l'offre de la puissance informatique chinoise.

Sans s'égarer dans la technique, il convient de rappeler la stratégie chinoise. La ligne est donnée par le président de Huawei, Xu Zhijun <sup>2</sup>, qui estime que pour stimuler le développement industriel et réduire l'écart avec les

concurrents étrangers, la Chine doit construire sans relâche un écosystème industriel durable, reposant sur l'utilisation à grande échelle des produits et technologies nationales, ce qui vaut tant pour la conception des puces que pour l'architecture informatique — à élaborer à distance des législations américaines.

Et les résultats sont déjà observables : le processeur Kirin 9000s, conçu par la société HiSilicon, est doté d'une architecture avancée à 12 cœurs (contre huit dans les architectures courantes) qui apporte une augmentation substantielle de la puissance de traitement. Son système d'exploitation, HarmonyOS 4.0, a pour lointaine origine une version *open source* modifiée d'Android. Ce nouveau *smartphone* sera le premier modèle de téléphone au monde doté d'une fonction d'appel direct du système satellitaire de pointe Tiantong-1 — indispensable pour communiquer dans les régions isolées ou semi-désertiques du pays.

### Déconvenues américaines

Cette performance annihile *de facto* la raison d'être des sanctions promulguées en 2019 par le gouvernement américain, sous la présidence de Donald Trump, qui devaient interdire à la Chine d'accéder aux technologies avancées des semi-conducteurs et retarder d'au moins 10 ans le rattrapage technologique de l'industrie électronique chinoise. Pour masquer ce cruel contretemps, les autorités américaines ont d'abord mis en doute la réalité de la percée

1. SOHAIL Omar, « SMIC, Which Made the Kirin 9000s, Is Just Four Years Behind the Most Advanced Node, U.S. Sanctions Were Aimed to Limit Capabilities by 10 Years », *Wccf (Where Consumers Come First) tech*, 30 septembre 2023. URL : <https://wccftech.com/smic-just-four-years-behind-most-advanced-node-thanks-to-kirin-9000s/>. Consulté le 27 novembre 2023.

2. « Huawei Calls for Massive Use of Home Grown Technology and Chips to Help Construct Sustainable Computing Ecosystem », *Global Times*, 17 septembre 2023. URL : <https://www.globaltimes.cn/page/202309/1298305.shtml>. Consulté le 27 novembre 2023.

de Huawei : la secrétaire d'État au commerce, Gina Raimondo, allant jusqu'à déclarer : « Le gouvernement américain n'a aucune preuve que [Huawei] puisse fabriquer à l'échelle de 7 nm [...]. Même si Huawei a trouvé un moyen de produire des puces [...] compatibles avec la 5G, les États-Unis ne pensent pas que l'entreprise puisse les produire en masse pour que cela soit significatif <sup>3</sup>. »

Mais elle a été contredite par Jake Sullivan, le conseiller à la Sécurité nationale, qui a annoncé le lancement d'une enquête pour comprendre comment le Huawei Mate 60 Pro a pu voir le jour. Jake Sullivan ne fait que répondre aux industriels américains qui ne font pas mystère de leur inquiétude. Car la principale conséquence de l'échec des sanctions est que l'industrie électronique chinoise peut désormais se positionner en concurrence directe face à ses homologues américains.

Dès à présent, Huawei est à l'attaque. Comme le relève Liu Dingding, un analyste basé à Pékin, « la stratégie de Huawei a consisté à mettre ses nouveaux téléphones sur les étagères juste avant le lancement clef d'Apple ». De plus, ses commerciaux peuvent s'appuyer sur une argumentation patriotique, le Mate 60 Pro est un cadeau plus présentable que l'iPhone, et les personnes qui

l'utilisent sont fières de leur pays. Face à ce rebond de Huawei, les experts s'accordent pour prédire la perte d'un tiers du marché chinois de l'iPhone d'Apple <sup>4</sup>.

## Succès chinois

Les manœuvres de Pékin ont été immédiatement couronnées de succès : le département américain du Commerce a capitulé. Le 9 octobre 2023, le journal chinois *Global Times*, reprenant l'agence Reuters, annonçait que les filiales chinoises de deux entreprises sud-coréennes, Samsung Electronics et SK Hynix, avaient été labellisées « *validated end user* » — un agrément capital pour ces deux groupes qui avaient investi des milliards de dollars US dans leurs filiales chinoises, qui fabriquent plus de 40 % de leurs puces les plus performantes. L'autorisation parallèle d'exportation d'équipements de production devrait permettre d'étendre leurs unités de production géantes.

Selon les commentateurs chinois, la guerre technologique voulue par Washington a finalement stimulé la résilience de Pékin : « Les sanctions américaines ont pu nous causer quelques problèmes à court terme, mais ces guerres ne leur ont été finalement pas été favorables. » La réapparition des *smartphones* Huawei après trois

3. BROWN C. Scott, « US Government Official Says HUAWEI Could Be Bluffing on Mate 60 Pro Chip Scale », Android Authority, 19 septembre 2023. URL : <https://www.androidauthority.com/huawei-mate-60-pro-chip-3365912/>. Consulté le 27 novembre 2023.

4. « Apple's New Products Face Challenges from Huawei's Rebound, High-end Mobile Phone Sector Becomes Fiercely Competitive: Analysts », *Global Times*, 11 septembre 2023. URL : <https://www.globaltimes.cn/page/202309/1298007.shtml> ; et « How Should Raimondo Accurately Understand Huawei's New Presales? », *Global Times*, 30 août 2023. URL : <https://www.globaltimes.cn/page/202308/1297291.shtml>. Consultés le 27 novembre 2023.

ans de silence forcé suffit à prouver que la répression américaine a échoué. Les décideurs de Washington devraient s'interroger : faut-il continuer dans une lutte à mort ou plutôt chercher un espace de coopération gagnant-gagnant à l'échelle mondiale <sup>5</sup> ?

D'autant que d'autres combats s'annoncent. Préparant l'arrivée de la technologie 6G, Huawei, première au monde, a dévoilé l'architecture de réseaux « 5.5G » qui, grâce à des innovations dans les technologies à large bande, multifréquences, multi-antennes, intelligentes et vertes, visent à décupler les capacités des réseaux 5G actuels <sup>6</sup>. Chine et États-Unis se défient désormais non plus seulement sur leurs offres d'équipements, mais en ce qu'ils représentent globalement en termes de puissance informatique. C'est un nouveau domaine d'affrontement : Pékin pousse tous ses feux pour développer ses infrastructures et sa puissance de calcul. Aujourd'hui, seconde derrière les États-Unis, la Chine entend accroître sa puissance informatique de 50 % d'ici à 2025 <sup>7</sup>, égalant alors les États-Unis.

---

5. « Huawei Strengthens Push for 5.5G, Says Network Capacity to Increase 10 Times », *Global Times*, 12 octobre 2023. URL : <https://www.globaltimes.cn/page/202310/1299776.shtml>. Consulté le 27 novembre 2023.

6. « China Aims to Increase Computing Power by more than 50% by 2025 », *Global Times*, 9 octobre 2023. URL : <https://www.globaltimes.cn/page/202310/1299520.shtml>. Consulté le 27 novembre 2023.

7. Pour dépasser les 300 exaFLOPS — 1 exaFLOP = 10<sup>18</sup> FLOPS (Floating point Operations Per Second / opérations à virgule flottante par seconde, unité de mesure de la puissance informatique).

## L'échec annoncé des sanctions

Oubliées donc les sanctions qui se sont révélées ineptes. Ce qui pouvait être prédit dès leur énoncé : de tout temps, les interdits technologiques prononcés à l'égard de la Chine se sont révélés contre-productifs. Ainsi, quand l'URSS a mis fin à son assistance nucléaire, les Chinois ont pris leur propre essor (au début des années 1960) et testé leur première charge atomique en 1964. De même, en 1993, l'administration Clinton a bloqué l'accès de la Chine à la technologie des satellites. Ce qui ne l'a pas empêchée d'y accéder et de posséder aujourd'hui plus de 500 satellites en orbite. Même revers avec le GPS : la Chine ne se voit accorder qu'un accès restreint au système en 1999, mais dès 2003, la première version d'un système concurrent, BeiDou, est opérationnelle ; elle a depuis rejoint, sinon dépassé, ses concurrents.

D'où la leçon à tirer de ce dernier épisode : contre un grand pays innovant comme la Chine, dotée d'ingénieurs de haut niveau qui se comptent en centaines de milliers, il ne peut pas y avoir de blocus technologique durable. Cela vaut aussi pour des pays de moindre surface mais qu'une volonté farouche anime, tels l'Iran et la Corée du Nord. Puisqu'elles sont intrinsèquement fragiles, si sanctions il y a, elles doivent surtout servir à ouvrir des négociations. ■

---

Source : ce texte est une version remaniée d'un article paru dans la *Lettre confidentielle Asie21-Futuribles*, n° 176, octobre 2023.

## E-carburants : quel apport à la décarbonation du transport ?

Véronique Lamblin

Les e-carburants (ou électro-carburants) sont des carburants fabriqués à partir d'hydrogène dit « vert » — c'est-à-dire produit par un procédé utilisant l'électrolyse de l'eau — qui est ensuite associé à du CO<sub>2</sub> capturé soit à la sortie d'usines, soit dans l'air, pour produire du méthane, du méthanol ou des carburants paraffiniques de synthèse tels que l'e-essence, l'e-gasoil ou l'e-kérosène. Mais ce type de production consomme énormément d'énergie : l'électricité nécessaire à la production de l'hydrogène par électrolyse, l'énergie nécessaire à la capture du CO<sub>2</sub>, puis l'énergie nécessaire aux réactions chimiques permettant de produire les e-carburants (essence, gasoil ou kérosène). Un rapport des industriels de l'énergie <sup>1</sup> précise que la plus grande part de la consommation énergétique est liée à la production d'hydrogène : le rendement de conversion de l'électricité en carburant est de 40 % à 60 % selon l'électrolyseur utilisé. Donc si les voies de synthèse pour faire réagir le gaz carboné avec l'hydrogène sont matures et bien connues, elles consomment néanmoins de l'énergie pendant le processus.

Surtout, la production de ces carburants repose sur une filière de production d'hydrogène et de capture du CO<sub>2</sub> qui n'est pas encore mature.

L'intérêt majeur de ces carburants liquides est qu'ils peuvent se substituer aux carburants fossiles classiques sans changement dans les usages. Leurs propriétés sont similaires mais ils ont l'avantage de présenter une plus grande pureté (moins de soufre ou de particules aromatiques, sources de pollution). Si ces carburants nécessitent du CO<sub>2</sub> pour leur fabrication, ils ne l'éliminent pas et se contentent de le recycler. Par ailleurs, comme les carburants fossiles, ils émettent des oxydes d'azote ou des particules lors de leur combustion.

Le potentiel des électrocarburants est important pour le transport maritime et l'aviation, car ces deux secteurs sont soumis à des réglementations européennes de plus en plus contraignantes, et l'électrification directe avec des batteries n'est guère envisageable, en l'état actuel de la science, sur de très longues distances. Le secteur maritime doit ainsi à la fois réduire les consommations des navires et utiliser des carburants dont le contenu en gaz à effet de serre devra être réduit de 2 % d'ici 2025 puis de 80 % en 2050. Pour faire face à ces obligations, le troisième transporteur maritime au monde, CMA-CGM (Compagnie maritime d'affrètement-Compagnie générale maritime) va commander des navires fonctionnant au gaz

1. Note de synthèse sur les électro-carburants, rapport du groupe de travail e-fuels d'Evolen, février 2023. URL : <https://www.evolen.org/wp-content/uploads/2023/03/15-03-2023-EVOLEN-Note-de-synthese-sur-les-e-fuels.pdf>. Consulté le 27 novembre 2023.

naturel liquéfié dans un premier temps, mais qui pourraient ensuite fonctionner au biométhane ou à l'e-méthane. Le deuxième transporteur mondial de conteneurs, Maersk, a annoncé, en 2021 <sup>2</sup>, un investissement dans des partenariats pour produire de l'e-méthanol pour décarboner le carburant de ses navires, et a prévu la mise en service de 19 navires fonctionnant à l'e-méthanol entre 2023 et 2025, pour atteindre sa cible de 25 % de carburant vert à l'horizon 2030, avec du biométhanol et de l'e-méthanol <sup>3</sup>.

Le problème majeur est de pouvoir disposer de suffisamment d'électricité verte pour produire ces carburants, compte tenu de la concurrence des autres secteurs (transport, industrie, logement) dans la consommation d'électricité verte.

Dans le transport aérien, les parlementaires européens ont adopté récemment une directive qui impose l'incorporation de carburants d'aviation durables, à hauteur de 2 % en 2025, 6 % en 2030, 20 % en 2035..., jusqu'à 70 % en 2050. Les carburants durables recouvrent les carburants liquides, les biocarburants et les carburants synthétiques issus de la filière

hydrogène. Aujourd'hui, ce sont principalement des huiles ou des graisses issues de déchets alimentaires hydrogénés. La France impose déjà 1 % de carburant durable aux avions depuis 2022. Or, les biocarburants commencent à manquer, la production ne suffisant pas pour répondre à la demande. En Europe, selon l'initiative ReFuelEU Aviation <sup>4</sup>, la production de carburants durables pour l'aviation est estimée aujourd'hui à 0,24 million de tonnes, alors que la demande en kérosène pourrait atteindre 46 millions de tonnes en 2030 <sup>5</sup>. Pour atteindre les objectifs européens, il faudrait donc presque quadrupler la production de carburants verts d'ici 2025, et la multiplier par plus de 10 à l'horizon 2030.

### Biocarburants et / ou e-carburants ?

En France, une part significative des biocarburants incorporés à l'essence et au diesel routier sont aujourd'hui importés. Le pays consacre environ 3 % de sa surface agricole à la production de biocarburants, fabriqués à partir de graines oléagineuses, mais cela reste insuffisant pour satisfaire la

---

2. « Maersk Secures Green e-Methanol for the World's First Container Vessel Operating on Carbon Neutral Fuel », Maersk, 19 août 2021. URL : <https://www.maersk.com/news/articles/2021/08/18/maersk-secures-green-e-methanol>. Consulté le 27 novembre 2023.

3. Voir notamment « Maersk Secures Green Methanol for Maiden Voyage of the World's First Methanol-Enabled Container Vessel », Maersk, 13 juin 2023. URL : <https://www.maersk.com/news/articles/2023/06/13/maersk-secures-green-methanol>. Consulté le 27 novembre 2023.

---

4. « Initiative ReFuelEU Aviation: le Conseil adopte une nouvelle loi visant à décarboner le secteur de l'aviation », communiqué de presse du Conseil de l'Union européenne, 9 octobre 2023. URL : <https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2023/10/09/refueleeu-aviation-initiative-council-adopts-new-law-to-decarbonise-the-aviation-sector/>. Consulté le 27 novembre 2023.

5. « Current Landscape and Future of SAF Industry », EASA (Agence européenne de la sécurité aérienne). URL : <https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/topics/sustainable-aviation-fuels/current-landscape-future-saf-industry>. Consulté le 27 novembre 2023.

demande et ces biocarburants dits de première génération entrent directement en concurrence avec la production alimentaire.

Les biocarburants de seconde génération, qui utilisent les pailles et les fibres, donc les déchets agricoles ou forestiers, sont attendus depuis longtemps. Des procédés de production sont arrivés en fin de phase d'expérimentation en 2022 en France, mais la date de mise en production industrielle n'a pas été encore précisée <sup>6</sup>. Il faut cependant prendre en compte que la production de la filière de seconde génération, comme les e-carburants, sera au moins deux fois plus coûteuse que les biocarburants d'aujourd'hui, eux-mêmes trois fois plus coûteux que le kérosène fossile.

Une directive européenne fixe comme objectifs, outre une part d'énergies renouvelables de 14 % dans l'ensemble du secteur des transports à l'horizon 2030, également une part de biocarburants avancés, c'est-à-dire de seconde génération, et de biogaz de 3,5 % au même horizon. Elle confirme le plafond actuel d'incorporation de biocarburants de première génération. Pour faire face à ces demandes croissantes et rapides de carburants décarbonés, les carburants électriques apparaissent comme une solution d'intérêt, surtout dans les filières indus-

trielles de transport plus difficiles à électrifier.

Mais la filière automobile aussi s'intéresse à ces carburants électriques : la partie n'est peut-être pas encore complètement perdue pour l'automobile thermique. Ainsi l'Allemagne, lors de la dernière ligne droite des négociations visant à interdire *de facto* les voitures thermiques en 2035, a obtenu de la Commission européenne, en mars 2023, qu'elle intègre une voie légale pour la commercialisation de voitures thermiques fonctionnant aux e-carburants. L'issue de ce nouveau parcours législatif ne sera connue qu'à l'automne 2024.

Les e-carburants, en raison de leur consommation électrique, sont contestés par les écologistes. Selon l'organisation non gouvernementale Transport & environnement (T&E), il faudrait cinq fois plus d'électricité pour faire 100 kilomètres en voiture fonctionnant à l'e-carburant qu'en voiture électrique <sup>7</sup>. Par ailleurs, la directive sur les énergies renouvelables de l'Union européenne les autorise à ne réduire leurs émissions de CO<sub>2</sub> que de 70 % comparativement aux carburants fossiles, permettant par exemple l'utilisation d'hydrogène d'origine fossile ; ces carburants émettraient alors plus de CO<sub>2</sub> que les véhicules électriques <sup>8</sup>. Ils sont

6. CHERGUI Fériel, « Biocarburants 2<sup>e</sup> génération une première industrielle pour la France qui arrive à point nommé », Lyon Entreprises, 30 mars 2022. URL : <https://www.lyon-entreprises.com/actualites/article/biocarburants-2eme-generation-une-premiere-industrielle-pour-la-france-qui-arrive-a-point-nomme>. Consulté le 27 novembre 2023.

7. T&E, « Scholz Is Fueled with Illusions », *Briefing*, mars 2023. URL : [https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2023/03/2023\\_03\\_DE\\_e-fuel\\_paper.pdf](https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2023/03/2023_03_DE_e-fuel_paper.pdf). Consulté le 27 novembre 2023.

8. T&E, « E-fuel Cars Are Not Zero Emission », *Briefing*, octobre 2023. URL : [https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2023/10/2023\\_10\\_Epetrol\\_briefing-1.pdf](https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2023/10/2023_10_Epetrol_briefing-1.pdf). Consulté le 27 novembre 2023.

perçus comme une tentative de maintenir les moteurs thermiques au-delà de 2035, alors que ces e-carburants si coûteux en énergie seront aux mieux réservés à du transport très longue distance ou à des usages de niche (véhicule de collection, sport automobile) dans le cas où l'électrification directe ou indirecte via l'hydrogène serait jugée trop contraignante. Selon T&E, l'essence synthétique coûterait 50 % plus cher que l'essence fossile (estimée à 2,82 euros le litre en 2030 en France).

Pour l'heure, la seule usine qui produise des e-carburants de façon industrielle au monde, celle de Porsche et Siemens au Chili, ouverte en décembre 2022, vise à produire 130 000 litres d'e-carburant par an mais à un coût 100 fois supérieur à l'essence ordinaire. En France, il existe 24 projets de production de carburants de synthèse, principalement du kérosène et du méthanol, pour une capacité de 528 000 tonnes équivalent pétrole et un coût de 3,6 milliards d'euros. Une telle production, si tous les projets voient le jour, nécessiterait 14 térawatt-heures par an, soit l'équivalent de 3 % de la production électrique française de 2022, en complément du CO<sub>2</sub>, pour produire moins de 10 % de la consommation nationale de carburants pour le transport aérien en 2022.

Comme il est nécessaire de pouvoir fabriquer de l'hydrogène vert en grande quantité et bon marché pour produire des e-carburants, on ne peut pas compter sur une production

conséquente de ces carburants avant 2035 au plus tôt. D'ici là, l'espoir d'accroître la part de carburants liquides moins émetteurs de gaz à effet de serre dans les transports de très longue distance repose d'abord sur les développements de biocarburants ligno-cellulosiques. Ceci d'autant que les progrès en génie génétique laissent espérer que l'on pourra modifier des bactéries pour produire de l'éthanol à partir de cellulose avec un bon rendement. La production d'e-carburants est plus consommatrice d'énergie que les biocarburants de seconde génération mais présente l'intérêt, à terme, de ne pas utiliser du tout de biomasse. ■

---

## Droit de la propriété intellectuelle et IA

*Vincent Fauchoux*

L'intelligence artificielle (IA) générative suscite de nombreuses questions en droit de la propriété intellectuelle. Une des plus saillantes porte sur le caractère protégeable ou non par la propriété intellectuelle des contenus générés par IA. Avant toute chose, nous considérons qu'il est superficiel de faire la distinction entre « contenu généré par » et « contenu assisté par » l'IA. En effet, tout contenu généré par IA est nécessairement assisté par un outil d'IA, et l'inverse est également vrai.

Un début de réponse est apporté en droit américain. Aux États-Unis, le Copyright Office, organisme chargé des questions de droit d'auteur, fournit une grille de lec-

ture sur la protection par le droit d'auteur des contenus générés par et / ou à l'aide d'une IA. Ainsi, lorsque le contenu est généré par IA de manière autonome ou sans aucun apport créatif ultérieur de l'utilisateur, l'Office considère que le contenu n'est pas le résultat d'un auteur humain et n'est donc pas protégeable par le droit d'auteur. En revanche, lorsque l'utilisateur sélectionne, arrange ou modifie de manière suffisamment créative le contenu généré par IA, le contenu qui en résulte peut constituer une œuvre originale protégeable au titre du *copyright* (droit d'auteur).

Trois exemples illustrent ce raisonnement avancé par l'Office :

- En février 2022, le Copyright Office a refusé d'accorder la protection par le *copyright* à une image intitulée « A Recent Entrance to Paradise », entièrement générée par l'outil d'IA Creativity Machine, faute pour Steven Thaler, à l'origine de la demande d'enregistrement, d'avoir démontré une contribution créative humaine <sup>1</sup>.
- En février 2023, le Copyright Office a partiellement annulé le *copyright* qu'il avait accordé à l'autrice de la bande dessinée *Zarya of the Dawn*, réalisée en 2022 avec l'assistance de l'IA MidJourney, au motif que les images générées par IA ne pouvaient prétendre à la protection par le droit d'auteur <sup>2</sup>.

L'Office américain s'appuie pour cela sur les dispositions du *Copyright Act*, qui énoncent que la protection du droit d'auteur est accordée aux œuvres originales des auteurs, celles-ci étant interprétées de manière uniforme par les tribunaux comme se limitant aux créations d'auteurs humains. Si Kris Kashtanova, l'autrice de la bande dessinée, a elle-même édité et modifié certaines des images générées par MidJourney, ces modifications ne sont pas suffisamment créatives pour bénéficier de la protection offerte par le *copyright*. L'Office souligne par ailleurs que l'utilisateur ne contrôle pas le processus de création des images, de sorte qu'il est incapable de les prévoir à l'avance et ne peut ainsi pas anticiper leurs caractéristiques esthétiques. En revanche, l'Office a accordé un *copyright* pour le texte, et la sélection, coordination et arrangement du texte et des contenus générés par IA, protégeables en tant que compilation.

- Enfin, un tableau intitulé « Théâtre d'opéra spatial », présenté par Jason Allen, a remporté le concours annuel des beaux-arts de la Colorado State Fair en septembre 2022. Ce tableau, créé à l'aide de l'IA MidJourney, est le résultat de 80 heures de travail et de milliers de *prompts* (descriptions textuelles fournies par l'utilisateur) ayant généré plus de 900 images, parmi lesquelles Jason Allen a choisi trois images qu'il a retouchées et imprimées sur une toile. Selon Jason Allen, « l'IA est un outil, tout comme l'est un pinceau, et une impulsion

1. « Re: Second Request for Reconsideration for Refusal to Register *A Recent Entrance to Paradise* », U.S. Copyright Office, 14 février 2022.

2. « Re: *Zarya of the Dawn*, Registration », U.S. Copyright Office, 21 février 2023.

créatrice reste nécessaire pour activer cet outil ». Cependant, l'Office américain a refusé de lui reconnaître des droits d'auteur, considérant qu'il n'est pas l'auteur de l'œuvre car sa seule contribution à l'image de Midjourney a été de saisir le *prompt*, puis d'y apporter des modifications visuelles.

La position de l'Office américain n'est donc pas totalement fermée et semble laisser la place à une protection pour les créations qui auraient été produites avec l'aide d'une IA, dès lors qu'il est possible d'y déceler un apport significatif de l'utilisateur personne physique.

En France, la question du caractère protégeable ou non d'un contenu généré par IA n'a pas encore été posée aux juridictions, mais plusieurs observations permettent d'esquisser un début de réponse en droit français. Tout d'abord, le code de la Propriété intellectuelle (CPI) est généreux, en ce qu'il protège les droits des auteurs sur toutes les œuvres de l'esprit, peu importe le genre, la forme d'expression, le mérite ou la destination (article L.112-1 du CPI). Pour être reconnue comme originale, et donc protégeable par le droit d'auteur, une œuvre doit refléter l'empreinte de la personnalité de son auteur. Or, seul un humain possède une personnalité pouvant transparaître dans son œuvre, de sorte que par principe, « l'auteur » vise nécessairement une personne physique. L'humain est donc central dans la création d'une œuvre et son éventuelle protection.

Néanmoins, de nombreuses œuvres sont réalisées à l'aide de machines et pourtant protégeables par le droit d'auteur. On pense notamment aux photos, réalisées à l'aide d'un appareil photo, aux vidéos, qui nécessitent une caméra, ou encore aux logiciels, permettant de créer nombre de contenus. Les débats à ce sujet tiennent au fait que l'aléa est souvent plus important entre le *prompt* fourni par l'utilisateur et le résultat généré par l'outil d'IA, qu'entre ce que souhaite produire l'auteur qui utilise un appareil photo ou un logiciel, et le résultat qu'il obtient. Cet aléa, intrinsèque à l'utilisation d'un outil d'IA, serait ainsi antinomique de la notion de création.

Cependant, l'aléa n'est-il pas inhérent à toute création, quelle que soit la forme qu'elle prend ? Il est ainsi possible de citer des artistes tels que Jackson Pollock ou Norman Bluhm, maîtres de l'*action painting*, qui ne peuvent nécessairement pas prévoir où la peinture tombera sur les toiles, ou encore César, dont la marque de fabrique consiste à compresser des carcasses de voitures.

Il sera intéressant de voir si les juridictions françaises, une fois saisies de cette question, adopteront la même approche que l'Office américain. Une décision majeure sur le sujet rendue par les tribunaux français est donc largement attendue, d'autant qu'il est à prévoir que d'ici 2030, un nombre considérable de contenus seront générés par IA. ■

# Analyses critiques & comptes rendus\*



**ANDLER Daniel**

## *Intelligence artificielle, intelligence humaine : la double énigme*

Paris : Gallimard (NRF Essais), mai 2023, 432 p.

D'emblée Daniel Andler nous livre son projet. L'intelligence humaine

est une énigme, l'intelligence artificielle (IA) en est une autre, mais ni l'une ni l'autre ne sont des mystères et c'est ce qu'il s'attache à démontrer. Le lecteur en jugera, mais le mérite de la démarche est avant tout de faire œuvre de clarification pour désigner ce dont on parle, en identifier les racines et en décrypter les ramifications et leurs fruits. L'intelligence artificielle est une émergence qui se révèle comme l'une des révolutions technologiques les plus radicales de l'histoire humaine.

La première des deux parties de l'ouvrage offre un survol analytique de la genèse de l'IA, jusqu'à ses derniers développements. D'abord les mots. L'auteur propose d'adopter l'expression « intelligence artificielle » — un oxymore qui renvoie à des concept flous — comme un mot

nouveau désignant une réalité tangible, comme nous le faisons dans le cas d'un pied-de-biche sans nous interroger sur le rapport avec le pied ou la biche. Et puis ce mot se décline à son tour pour désigner une IA *stricto sensu* limitée au domaine académique et professionnel, une IA tronquée qui correspond aux applications et algorithmes faisant appel au *deep learning* (apprentissage profond) et enfin une IA *lato sensu* qui englobe tous les apports des technologies numériques dans la réalisation de tâches quelconques. En ce sens, l'IA apparaît comme la force agissante de l'écosystème numérique (la « numérisphère »), qui se développe au point de faire émerger une strate supplémentaire du monde humain.

Le processus ensuite. La réflexion sur l'intelligence humaine s'est développée durant des siècles sans référence à l'IA, même si certains esprits ont rêvé d'avatars mécaniques intelligents. L'apparition

\*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/](https://www.futuribles.com/publications/?filter_category=40/) (NDLR).

de l'intelligence artificielle est récente. Son surgissement doit beaucoup aux avancées conceptuelles en matière de calcul, d'information, de contrôle ou encore au progrès des sciences de la cognition. En même temps, son développement est indissociable des progrès des ordinateurs dont elle a gardé une dualité fondamentale : ses usages relèvent à la fois de la théorie et de l'empirisme. Cette dualité se perpétue dans les projets de ses créateurs : l'un tient du rêve prométhéen d'une copie de l'intelligence humaine ; l'autre ressemble à un rêve d'ingénieur qui mobilise les savoir-faire dans une démarche empirique.

Le premier projet a donné naissance à l'IA dite classique ou symbolique, qui a connu des réussites, mais dont les applications sont cependant apparues limitées. Elle est désormais supplantée par l'IA connexionniste qui, schématiquement, tire ses capacités du *deep learning*. C'est l'IA des données de masse, capable de révéler ce qu'elles cachent en explorant leurs régularités. Elle n'a pas d'autres prétentions que son efficacité statistique, mais ses performances indéniables lui donnent une assise solide et lui assignent des objectifs réalistes.

Les perspectives enfin car le connexionnisme n'est pas la fin du chemin. Cette IA souffre de cécité sémantique, elle est tributaire des corpus de données de son apprentissage, dépourvue de raisonnement causal et mal armée pour l'extrapolation. Pire peut-être pour une machine, elle est fail-

liblé, et ses erreurs sont difficiles à prévoir et à expliquer. Alors elle pourrait décevoir ses utilisateurs et connaître à son tour une forme d'hiver. Mais la mobilisation industrielle et les résultats acquis relancent la course en se focalisant sur ce qui reste à conquérir pour créer une IA généraliste, voire dans le futur, la doter d'une compréhension véritable, d'émotion, de conscience ou d'autonomie, en dépit des incertitudes sur de telles avancées ou même de leur pertinence.

Aussi la seconde partie de l'ouvrage est-elle consacrée à la perspective d'une troisième époque vers une intelligence augmentée. Techniquement, les systèmes actuels peuvent évoluer de multiples manières. On peut imaginer des systèmes capables d'apprendre à apprendre, incorporer des techniques de l'IA symbolique ou combiner statistique et *deep learning*. De même, on peut élaborer des systèmes d'IA capables de manier des structures combinatoires, étendre la compétence des réseaux à des objets complexes, assembler des modules fonctions distinctes géométrique, algébrique ou symbolique du traitement ou encore recourir à la programmation différentielle, etc.

Cependant, la somme des capacités à résoudre des problèmes ne suffit pas à définir une intelligence. Celle-ci se manifeste dans la réponse qu'elle préconise face à une situation donnée. Or la réponse optimale, à quelque situation que ce soit, est une vue de l'esprit. Quand celles-ci

sont complexes, la réponse est discutable selon de nombreux points de vue. À ce titre, l'évaluation objective finale est remise en question et renvoie de fait à la possibilité d'une gradation des intelligences. Et puis la versatilité et la fluidité sont indissociables de l'autonomie, elles supposent que le système puisse identifier le problème et s'y consacrer *motu proprio*.

Aujourd'hui, ce n'est pas le cas et demain, c'est incertain car l'IA n'a pas d'engagement personnel, elle est indifférente à la réussite ou à l'échec et elle manque de la capacité à s'abstraire de considérations rationnelles. Ainsi les intelligences humaines sont étroitement liées et en même temps fondamentalement différentes ; copier l'intelligence est une chimère, mais sous-estimer l'incidence de l'intelligence artificielle sur notre avenir est un aveuglement.

Dans ce contexte, l'auteur nous propose trois conceptions de l'avenir : une IA générale de niveau humain, une superintelligence artificielle (SIA) et une intelligence artificielle transformatrice. Ces trois situations sont liées car elles correspondent à des systèmes beaucoup plus puissants que ceux que nous connaissons, toutes sont transformatrices et requièrent des percées conceptuelles sur lesquelles règne l'incertitude.

L'IA générale suppose de concevoir, c'est-à-dire doter d'un contenu précis et fabriquer quelque chose dont l'intelligence humaine serait une incarnation. Il

faudrait en sélectionner les caractéristiques et pouvoir les produire comme on a reproduit le vol des oiseaux. L'éventail des voies possibles est large : fabriquer une émulation du cerveau humain pour reproduire *in silico* les processus cérébraux ; développer des machines capables d'apprendre à apprendre ou encore laisser une population de systèmes artificiels capables de se reproduire évoluer dans un environnement en cherchant une adaptation optimale. La superintelligence égalerait ou surpasserait les capacités humaines dans de nombreux domaines. Cela interviendrait après l'étape de l'IA générale, avec la création d'un premier avatar de superintelligence qui engendrerait à son tour une IA qui lui serait supérieure. Enfin, on ne peut pas exclure l'hypothèse d'une superintelligence apparaissant sans passer par la case humaine, beaucoup plus puissante que les SIA actuelles.

Certes, de nombreuses incertitudes planent sur chacune de ces trois situations. Aucune ne peut être écartée ; ce qui nous conduit à interroger leur désirabilité. Avec la superintelligence et le quadrillage étroit d'une grande partie des activités humaines qui s'en suivrait, l'humanité se retrouverait dans une situation analogue à celle des aristocrates de l'Ancien Régime, entourés d'une nuée de domestiques et d'effendis plus compétents qu'eux. Progressivement, ces intelligences seront indispensables et la marge de manœuvre humaine de plus en plus étroite.

Selon Daniel Andler, l'enjeu est là : aller vers une intelligence artificielle capable de faire face aux situations, en se soumettant à la norme du jugement humain. Et selon lui, cela suppose de respecter un principe de modération dans les usages et de définir les

rôles respectifs des intelligences humaine et artificielle, faute de quoi nous risquons d'être dépendants de systèmes auxquels nous n'aurons pas su transmettre la sagesse. ■

Jean-François Soupizet



## COLLECTIF

### « Quelle université voulons-nous ? »

*Esprit*, n° 499-500, juillet-août 2023, 208 p. URL : <https://esprit.presse.fr/tous-les-numeros/quelle-universite-voulons-nous/922>. Consulté le 10 novembre 2023

La revue *Esprit*, qui a déjà consacré plusieurs

numéros à la situation de l'Université en France, avec un premier « SOS à l'Université » en juillet 1946, s'interrogeait, dans son édition de l'été 2023, sur la mission des universités et les moyens qui leur sont accordés, en donnant la parole à une douzaine d'universitaires.

Depuis les années 1960, l'Université est engagée dans une mutation profonde, un « tournant » souligne Julien Gossa en s'appuyant sur des données : l'enseignement supérieur s'est massifié, les effectifs d'étudiants passant de 200 000 en 1960 à 1,6 million en 2022. De nouvelles universités ont été créées et les objectifs que la France s'était fixés — 80 % d'une classe d'âge avec le diplôme du baccalauréat et 50 % de celle-ci ayant un diplôme universitaire —

ont été atteints. Depuis le début du siècle, une frénésie de réformes s'est emparée des universités, portant sur l'organisation interne avec une autonomie de gestion, des fusions d'établissements, l'affichage d'une politique d'excellence dans un contexte de compétition internationale exacerbée par le classement dit de Shanghai, et un marché des formations de l'enseignement supérieur privé. Leur financement est devenu un problème majeur : en 2022, sur les 18 milliards d'euros de leur budget, 73 % couvrent les charges de service public, contre 87 % en 2014 ; elles complètent les besoins de financement par des ressources propres, notamment des contrats de recherche.

Elles doivent aussi faire face à deux défis sous-estimés : la croissance des effectifs d'étudiants (de 20 % en sept ans) n'a pas été accompagnée par l'augmentation du nombre d'enseignants titulaires,

d'où un recours croissant à des contractuels et un encadrement des étudiants qui n'est pas satisfaisant ; et à partir de 2016, les inscriptions d'étudiants en première année de *master*, le plus haut niveau de qualification, baissent fortement, alors que celles en troisième année de licence sont en augmentation continue. La politique du ministère de l'Enseignement supérieur est confuse : il préconise la hausse des effectifs en licence, le *master* et le doctorat étant des formations exigeantes irriguées par la recherche, mais sans proposer de solutions pour les étudiants exclus des *masters*.

Christine Musselin, sociologue au CNRS (Centre national de la recherche scientifique), spécialiste de l'Université et de sa gouvernance <sup>1</sup>, et ses collègues Joël Laillier et Christian Topalov font un bilan très mitigé des réformes intervenues dans les universités depuis 2007 (loi accordant leur autonomie). Celles-ci ont certes acquis une plus grande capacité de décision, mais la multiplication des appels à projets pour les financements, notamment dans la recherche, a conduit à une recentralisation nationale du pilotage des moyens, tandis qu'en interne, la bureaucratisation des processus de décision s'est accrue. Or, le discours sur « l'économie de la connaissance » modifie le mode de gestion de la science et les rapports de pouvoir au sein des universités. L'État n'a pas mis

en place un modèle pour celles-ci, mais privilégié les grandes universités de recherche, accordant de fait une priorité à la mission de recherche et baissant la dotation par étudiant. L'évaluation, qui est certes nécessaire, a été renforcée, mais sans définir les critères des bonnes pratiques scientifiques. Les auteurs concluent que l'autonomie s'est traduite par un renforcement de la centralisation guidée par « le nouveau management public ». Christine Musselin souligne aussi qu'il faut former des étudiants à des emplois, mais éviter une conception « court-termiste » de la mission de l'enseignement supérieur.

La deuxième partie du dossier s'intéresse à la vie des universitaires. Ses sept auteurs font un diagnostic quasi identique. L'enseignement supérieur et la recherche constituent un milieu qui va mal (sans doute davantage en sciences humaines). La transformation du métier d'enseignant, la concurrence avec les Grandes Écoles, le manque de moyens face à des charges administratives croissantes, la précarité de la situation des jeunes enseignants, sont à l'origine d'un malaise et rendent le métier moins attractif pour les jeunes. Malgré ce constat pessimiste, les auteurs gardent confiance dans la mission des universités : produire des savoirs, former à des métiers, développer l'esprit critique dans un lieu d'études épanouissant. La création d'un salaire étudiant, longtemps évoquée, ainsi que l'amélioration de la situation des doctorants et l'élimination des

---

1. MUSSELIN Christine, *La Grande Course des universités*, Paris : Presses de Sciences Po, 2017, analysé in *Futuribles*, n° 424, mai-juin 2018, p. 25-30.

inégalités de genre (les femmes sont plus souvent contractuelles) seraient des avancées majeures.

La dernière partie du dossier envisage l'Université à venir. L'historien Patrick Weil, qui enseigne à l'université de Yale aux États-Unis, relate que ses collègues américains s'étonnent que l'Université française fasse aussi bien avec si peu de moyens... Depuis 1990, ajoute-t-il, la France semble agir sous des « injonctions extérieures comme le classement de Shanghai dont les universités américaines se moquent éperdument » (il est vrai qu'elles n'en ont pas besoin pour attirer les chercheurs réputés). La France a choisi de « faire gros » en fusionnant les universités alors que nombre d'établissements à l'étranger et certaines Grandes Écoles sont de taille moyenne. Ayant fait une grande partie de sa carrière au CNRS, Patrick Weil estime que la liberté qu'offre cette institution pour la création scientifique est un atout pour la France, envié à l'étranger car, estime-t-il, c'est la qualité de sa production scientifique qui fait la première valeur d'une université. Son expérience américaine le conduit à plaider pour une libération des professeurs de leurs charges administratives afin qu'ils consacrent plus de temps à la recherche. Il constate que les dirigeants politiques ont un mépris pour l'Université, une *Terra incognita*, mais, souligne-t-il, les universitaires doivent participer au débat public en explicitant leurs travaux.

Revenant sur l'autonomie des universités, Christophe Prochasson

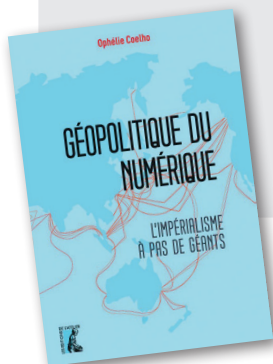
(qui fut conseiller du président François Hollande) défend leur autoadministration, au service de la production et de la diffusion des savoirs, associant des enseignants-chercheurs. La philosophe Fabienne Brugère conclut ce numéro avec « des rêves d'avenir » pour l'Université. Se référant à Jacques Derrida et à l'université de Vincennes, créée après mai 1968, elle estime que l'Université devrait être « sans conditions » afin de travailler selon un principe de liberté et de participer à la critique des savoirs. Mais elle est de fait « sous conditions » car soumise à des plans stratégiques et à une sélection de ses étudiants par l'algorithme de Parcoursup. À l'avenir, elle doit déployer une recherche imaginative et interdisciplinaire avec des formations adaptées aux étudiants, être un lieu de rencontres et un carrefour des savoirs, et capable d'imaginer des structures audacieuses pour l'avenir. Vaste programme !

Ce dossier est paru à point nommé, à un moment où le budget des universités est sur la sellette et où la situation souvent précaire des étudiants est évoquée, mais sans pour autant susciter un débat sur la mission de ces établissements. On peut regretter qu'*Esprit* n'ait pas donné la parole à des représentants des « sciences dures » (physique, biologie, etc.), de la médecine et des mathématiques, qui auraient davantage abordé la question des missions de recherche de l'Université, alors que le nombre de doctorants baisse continûment depuis 10 ans et que les indica-

teurs montrent que la France est engagée sur la pente d'un lent déclin scientifique. Enfin, le rôle de l'Université dans la formation des élites de pays en développement

aurait aussi mérité d'être évoqué. Cela étant, ce dossier est à la fois un nouveau SOS et un salubre appel à idées. ■

Pierre Papon



**COELHO Ophélie**  
**Géopolitique du numérique**  
**L'impérialisme à pas de géants**

Paris : Les Éditions de l'atelier, août 2023, 256 p.

Et si le XXI<sup>e</sup> siècle voyait l'avènement de nouveaux empires, numériques, sortes de chimères privées et publiques dont la puissance reposerait sur le contrôle de leviers économiques, politiques et surtout, technologiques ? Quelles nouvelles dépendances émergent à mesure que l'usage du numérique devient de plus en plus prégnant dans les sociétés ? Quelles sont les implications géopolitiques, mais aussi sociales, environnementales, territoriales de ces dynamiques pour nos sociétés ?

Dans son ouvrage *Géopolitique du numérique*, Ophélie Coelho, chercheuse indépendante spécialiste des enjeux relatifs à la géopolitique du numérique et professionnelle du secteur, propose d'examiner les enjeux géopolitiques propres au numérique et ce faisant, de souligner l'importance des choix stratégiques en la matière pour « le devenir des sociétés humaines » (p. 13).

Dans un premier temps, à travers le récit de l'émergence et de la croissance des grandes multinationales du numérique, l'auteur nous invite à réfléchir aux relations de dépendance engendrées et entretenues par les producteurs de technologies. Désormais transnationales, les entreprises du numérique endossent l'habit d'acteur des relations internationales et s'inscrivent dans des logiques de *soft power*<sup>1</sup>. Elles adoptent des « stratégies d'expansion technologique », traduisant des logiques impérialistes à peine déguisées.

Ainsi, elles cherchent à assurer une présence territoriale globale, à préserver leur stature monopolistique et à entretenir des relations d'influence avec les États qui bénéficient de leurs produits et services. D'une *Big Science* gérée par l'État — à l'image du projet Manhattan dont la finalité

1. NYE Joseph Jr., *Soft Power: The Means to Success in World Politics*, New York : Public Affairs, 2004.

bien connue est l'invention de la bombe atomique —, on assiste à l'avènement d'une Big Tech, soutenue par la recherche privée, dont la Silicon Valley est la vitrine.

Par ailleurs, les pouvoirs sont redistribués « entre autorités publiques et acteurs privés », alors que les multinationales technologiques ont développé leurs propres formes de puissance, à la fois « relationnelle et structurelle <sup>2</sup> ». Cependant, le modèle chinois dénote : l'État-parti fait en sorte de conserver le contrôle des entreprises technologiques privées œuvrant sur son territoire, en limitant notamment ses dépendances aux technologies états-uniennes.

Dans un second temps, Ophélie Coelho se concentre sur les stratégies de mise en dépendance adoptées par les producteurs de technologies. L'exploitation de la méconnaissance de l'objet numérique en est une, alors que le code informatique et les infrastructures nécessaires au fonctionnement de ce dernier ne sont pas visibles du consommateur final. Cette apparente dématérialisation et le mystère qui entoure les choses numériques permettent aux géants du secteur de créer une dépendance à leur expertise. Ainsi, l'utilisateur devient un simple « consommateur d'interface » et ne comprend pas le fonctionnement des outils dont il se sert.

---

2. STRANGE Susan, *Le Retrait de l'État. La dispersion du pouvoir dans l'économie*, Paris : Temps présent, 2011.

Une autre stratégie est la mise à contribution de « passeurs de technologies » qui facilitent l'intégration et l'adoption de nouvelles technologies au sein des sociétés. Enfin, l'accaparement des infrastructures physiques sous-jacentes est l'un des objectifs des géants du numérique, qui cherchent à posséder leurs propres centres de données et câbles sous-marins.

Par sa position centrale, le continent européen apparaît alors comme un carrefour stratégique, alors que les géants cherchent à s'étendre en Afrique, une région qui représenterait un marché lucratif. La (con)quête de cette clientèle s'inscrit dans une logique que l'on pourrait qualifier de néocolonialiste et qui sert souvent les intérêts des géants au détriment des populations locales. Surtout, le caractère physique du numérique implique à terme un fort impact sur les territoires où il s'incarne, notamment sur le plan hydraulique et énergétique.

Sommes-nous en train d'assister à l'émergence d'un monde déséquilibré où règnerait un néocolonialisme technologique ? Les régions du monde qui génèrent les données et celles qui les exploitent et les hébergent seront-elles inévitablement dissociées ? « L'instrumentalisation de l'interdépendance, l'utilisation de techniques d'influence et les stratégies d'assujettissement, menées par les États comme par les entreprises » permettent à l'autrice d'affirmer qu'il y a là une « muta-

tion géopolitique inédite<sup>3</sup> », où les grands acteurs du numérique jouent un rôle prépondérant.

En conclusion de son ouvrage, Ophélie Coelho propose quelques pistes pour mieux gérer les dépendances présentées plus tôt. Cela peut être la limitation juridique et politique du champ d'action des géants du numérique, ou encore le foisonnement d'un champ d'étude pluridisciplinaire sur la géopolitique du numérique, qui permettrait de mieux comprendre les subtilités des mutations en cours. En outre, donner au consommateur de technologie les outils nécessaires pour comprendre le fonctionnement des produits qu'il utilise, mais aussi leur matérialité, devrait à terme l'aider à « mieux penser le monde d'aujourd'hui et organiser celui de demain ». Favoriser la naissance d'une « démocratie technique » où les questions sociotechniques feraient l'objet de décisions politiques collectives serait alors souhaitable.

Les États devront aussi devenir producteurs plutôt que consommateurs de technologies. Comment ? En légiférant pour dissoudre les monopoles et en développant un maillage d'entreprises moyennes, en s'efforçant de conserver le contrôle sur les infrastructures stratégiques, en préservant les savoir-faire d'entreprises encore indépendantes et capables d'agir dans des secteurs

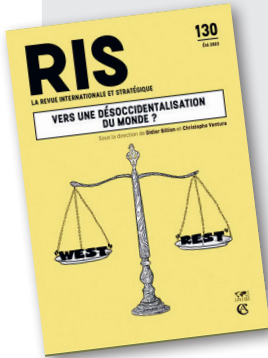
à forte valeur stratégique. Enfin, il s'agira d'analyser en profondeur les impacts potentiels des projets technologiques ayant vocation à s'implanter sur un territoire, en privilégiant une vision à long terme et favorisant l'utilisation raisonnée et proportionnée des outils numériques.

On appréciera la richesse des illustrations proposées par l'auteurice pour étayer ses arguments, qui témoignent de son expérience dans le secteur du numérique. Si la mise en œuvre des pistes avancées pour mieux gérer les dépendances paraît tout à fait souhaitable, elle semble épineuse à court terme. Les moyens souvent insuffisants, la pénurie de savoir-faire et la complexité des systèmes d'information rendent difficile la sortie des schémas de dépendance qui prévalent aujourd'hui en Europe. En outre, le discours politique européen parfois contradictoire, qui associe transition environnementale et numérique, laisse à penser que l'avènement d'une consommation plus raisonnée des technologies est encore difficilement envisageable.

Finalement, le message édifiant qu'il faudra retenir de cette lecture est le suivant : choisir ses technologies, c'est aussi choisir un monde, non pas immatériel et désincarné comme on a parfois tendance à le croire, mais physique, avec des conséquences environnementales et sociales durables et bien réelles. ■

Juliette Guilbaud

3. CATTARUZZA Amaël, « Vers une géopolitique numérique », *Constructif*, n° 60, novembre 2021, p. 46-50. URL : <https://www.caim.info/revue-constructif-2021-3-page-46.htm>. Consulté le 10 novembre 2023.



**BILLION Didier / VENTURA Christophe**  
(sous la direction de)

## « Vers une désoccidentalisation du monde ? »

*La Revue internationale et stratégique*, n° 130, été 2023, 124 p., IRIS (Institut de relations internationales et stratégiques). URL : <https://www.iris-france.org/publications/ris-130-ete-2023/>. Consulté le 10 novembre 2023

La guerre en Ukraine a, parmi d'autres enseignements, révélé au monde une prise de distance des pays émergents à l'égard de l'Occident. En effet, si 141 pays ont voté la résolution condamnant l'agression russe, 35 pays dits du Sud se sont abstenus, représentant 50 % de la population mondiale. Quant aux sanctions contre la Russie, seuls les pays Occidentaux les appliquent.

La fracture entre « *the West and the Rest* <sup>1</sup> » se serait-elle amplifiée, dans un processus plus long de « désoccidentalisation du monde » ? Plus généralement, la notion de « désoccidentalisation » est-elle pertinente pour penser les relations internationales aujourd'hui ? Faut-il lui préférer celle de « multi-alignement » ou de « non-alignement », appliquées respectivement à l'Inde et aux pays d'Amérique latine pour décrire leur stratégie de politique étrangère ?

Ces questions, Didier Billion et Christophe Ventura les ont posées

1. Expression inspirée du titre du livre de Niall Ferguson, *Civilization: The West and the Rest*, Londres : Allen Lane, 2011 (analysé in *Futuribles*, n° 378, octobre 2011, p. 85-87).

à des autrices et auteurs issus de différentes régions et disciplines, afin d'en faire le thème d'un dossier spécial dans *la Revue internationale et stratégique*. Leurs réflexions, construites et argumentées, convergent vers une analyse plus nuancée et moins doctrinaire que le terme de désoccidentalisation ne le suggère : désormais, les puissances occidentales doivent compter avec de nouveaux acteurs qui, conscients de leur poids économique et démographique, cherchent à s'émanciper des pressions diplomatiques, économiques et militaires, pour poursuivre leurs intérêts propres et répondre aux enjeux de leur politique intérieure.

Le terme même de désoccidentalisation mérite d'être questionné. Selon Rony Brauman, ancien président de Médecins sans frontières, ce terme renvoie, en miroir, à celui d'orientalisme, suggérant l'existence de deux blocs cimentés chacun par une même culture. De même, le concept de « Sud global », sans être totalement vide de sens, suggère une unité entre ces pays qui, du point de vue de l'auteur, n'apparaît qu'en situation de tension.

Intervenant sur la position des pays africains à l'égard de l'Occi-

dent, El Hadj Souleymane Gassama, journaliste et docteur en sociologie, partage cette analyse : parler de désoccidentalisation revient à faire de l'Occident l'unité de mesure des évolutions en cours. Or, outre qu'il gomme la fragmentation du continent africain, ce terme annule la prégnance de valeurs « labellisées occidentales », du fait des échanges migratoires et de l'adoption de systèmes politiques ou modèles de développement copiés sur ceux des démocraties occidentales. Selon l'auteur, les interconnexions entre les pays africains et ceux de « l'Ouest » sont si nombreuses qu'une rupture franche à leur égard est difficilement envisageable.

Selon Chloé Ridet, haut-fonctionnaire et porte-parole du Parti socialiste français, le terme « d'Occident collectif » est volontairement dévoyé par Vladimir Poutine, qui l'agite « comme un épouvantail » dans sa bataille de l'opinion mondiale. Ce faisant, il attise le ressentiment des pays du Sud, mais surtout relègue l'Union européenne dans une position subalterne, pour mieux « l'invisibiliser ».

Pourtant, comme l'explique Jean-Dominique Giuliani, président de la Fondation Robert Schuman, face à la Covid, au changement climatique, à la menace chinoise ou à la guerre en Ukraine, l'Europe n'a-t-elle pas su réagir ? L'Union européenne n'est pas l'Occident, et ses succès témoignent selon lui du peu de légitimité du terme désocciden-

talisation. Dans un monde où les critères de puissance ont évolué, l'Union européenne — dont le modèle est copié dans de nombreuses régions du monde, rappelle-t-il — dispose d'atouts indéniables, et notamment, celui de son recours au *soft power*. Et de citer, à titre d'exemple, les sommets Union-Afrique, qui abordent de manière concrète les aspects financiers et réglementaires de programmes environnementaux ou économiques, contrairement aux réunions entre États africains d'une part, Chine ou Russie de l'autre, davantage apparentées à une mise en scène médiatique, sur fond de domination impérialiste.

Il n'en demeure pas moins que les pays non occidentaux partagent un « *ethos* commun <sup>2</sup> », à savoir leur défiance à l'égard de l'Occident. Comment l'expliquer ? Selon Rony Brauman, l'insistance occidentale à proclamer des valeurs soi-disant universelles incite à contre-proclamer des valeurs locales, ayant trait à la communauté, la religion, la tradition. En outre, quel crédit accorder à des pays qui revendiquent la paternité de la Déclaration universelle des droits de l'homme de 1948, mais ignorent ces droits, voire les bafouent, en choisissant leurs causes suivant leurs intérêts, s'interroge-t-il ?

Selon El Hadj Souleymane Gassama, de nombreux Africains éprouvent un sentiment de

---

2. DUCLOS Michel, *Guerre en Ukraine et nouvel ordre du monde*, Paris : Éditions de l'Observatoire, février 2023.

relégation, qui se transforme en ressentiment lorsqu'il est attisé par des chefs d'États soucieux de trouver des boucs émissaires pour masquer leurs propres défaillances. De surcroît, la diversification des partenaires — Chine, Russie, Maroc, Turquie, Israël — facilite la sortie d'une logique de blocs, même si les nouveaux arrivants, comme les anciens colonisateurs, sont mus par un désir d'impérialisme économique.

Joan Deas, directrice exécutive de l'iReMMO (Institut de recherche et d'études Méditerrané Moyen-Orient), partage la même opinion. Dans son article sur les BRICS (Brésil, Russie, Inde, Chine et Afrique du Sud), elle insiste sur la frustration commune de ces pays, trop longtemps maintenus à la périphérie du cercle des décideurs politiques. Conscients de leur nouveau poids économique, ils attendent, de la part des Occidentaux notamment, plus de reconnaissance, de redistribution et d'égalité de traitement sur la scène internationale. Par ailleurs, ils voient dans la Chine un modèle alternatif à l'ordre occidental, dans le domaine tant commercial que technologique ou sécuritaire, modèle désormais promu par Pékin, sous le nom d'Initiative de civilisation mondiale <sup>3</sup>.

Selon Carlos Fortin, Jorge Heine et Carlos Ominami <sup>4</sup>, la remise

en cause d'un ordre international sous domination occidentale est l'occasion pour les pays d'Amérique latine de construire une réponse commune et, partant, de renforcer l'intégration régionale. À cet égard, ce qu'ils nomment « non-alignement actif », loin d'être un concept prospectif, s'observerait empiriquement dans le rapprochement des politiques étrangères de ces pays.

L'Inde, pour sa part, mène une stratégie active de multi-alignement, comme l'explique Tara Varma de la Brookings Institution, afin d'assurer son autonomie stratégique. Elle aurait ainsi noué 30 partenariats stratégiques depuis 1998. Plus particulièrement, dans la zone indo-pacifique, elle est présente à travers de multiples formats — les BRICS, le Quad <sup>5</sup>, l'OCS (Organisation de coopération de Shanghai), le G20... — dans le but de s'affirmer face à la Chine, de réduire sa dépendance à l'égard de la Russie, et plus généralement de se positionner comme *leader* du « Sud global ».

Difficile de prédire les évolutions à venir de l'ordre mondial : s'agira-t-il d'une plus grande intégration des puissances émergentes dans l'ordre libéral existant ou, à l'autre extrême, d'un rejet du multilatéralisme au profit de relations uniquement transactionnelles ? Selon Stephan Lehne, chercheur visiteur à Carnegie Europe, cité à plusieurs reprises par Joan Deas,

---

3. Discours de Xi Jinping au sommet des rencontres entre partis communistes, en mars 2023 : principes et valeurs d'une civilisation mondiale, pour faire progresser le processus de modernisation de l'humanité.

4. Carlos Fortin est professeur émérite à l'université du Sussex ; Jorge Heine, professeur à

---

l'université de Boston ; Carlos Ominami, ancien ministre de l'Économie du Chili.

5. Dialogue quadrilatéral pour la sécurité, regroupant les États-Unis, l'Inde, l'Australie et le Japon.

le système multilatéral devrait survivre, ne serait-ce que parce que le degré d'intégration économique nécessite une coopération institutionnalisée, mais le respect des règles pourrait reculer devant les jeux de pouvoir. Dans ces

conditions, l'humanité saura-t-elle répondre aux menaces globales que sont le changement climatique, le risque sanitaire ou l'insécurité alimentaire ? ■

Justine Fernandez



## RTE (Réseau de transport d'électricité) *Bilan prévisionnel, édition 2023. Futurs énergétiques 2050 → 2023-2035 : première étape vers la neutralité carbone*

Paris : RTE, octobre 2023, 96 p. URL : <https://assets.rte-france.com/prod/public/2023-10/2023-10-02-bilan-previsionnel-2023-principaux-resultats.pdf>. Consulté le 15 novembre 2023

RTE actualise, dans ce « bilan prévisionnel », son rapport *Futurs énergétiques 2050*<sup>1</sup>, pour la période 2023-2035, à mi-parcours de l'objectif de neutralité carbone que s'est fixé la France à l'horizon 2050. Cette mise à jour et ce bilan interviennent alors que le contexte géopolitique et économique a fortement changé depuis 2021 : guerre en Ukraine suivie d'une crise énergétique, augmentation du prix de certaines énergies (pétrole, gaz), objectifs climatiques européens (*Fit for 55*) à l'horizon 2030 plus ambitieux (réduire les émissions de gaz à effet de serre de l'Union d'au moins 55 %

d'ici 2030), objectif de réindustrialisation de la France, rivalité sino-américaine.

RTE estime que la sortie des énergies fossiles (60 % de la consommation d'énergie en France) est plus que jamais impérative alors que l'ensemble des dépenses énergétiques s'élevait à 116 milliards d'euros en 2022 (une forte hausse par rapport aux années 2010 où elles étaient inférieures à 80 milliards d'euros) et que, pour y parvenir, la France doit nécessairement électrifier son économie. RTE envisage trois scénarios sur la consommation d'électricité, fonction de rythmes d'évolution différents, de l'électrification des usages et de la production des énergies bas-carbone : « Accélération réussie », « Atteinte partielle » et « Mondialisation contrariée ».

Le premier scénario est le plus volontariste, avec trois *mix* possibles

1. *Futurs énergétiques 2050. Les scénarios de mix de production à l'étude permettant d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050*, Paris : RTE, 2021. URL : <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques#Lesdocuments>. Consulté le 15 novembre 2024 (analysé in *Futuribles*, n° 446, janvier-février 2022, p. 127-130).

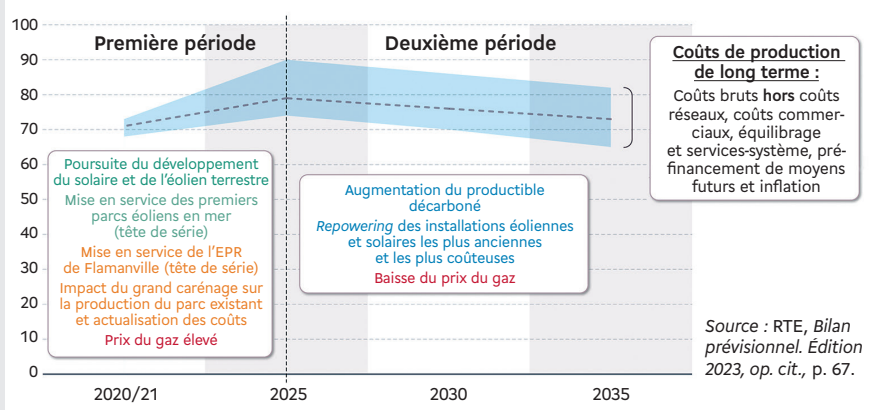
pour le couple consommation / production. Le deuxième correspond à un succès mitigé, s'expliquant par un retard des mesures d'efficacité énergétique et de la montée en puissance des énergies renouvelables, mais conservant un cadre encore compatible avec l'objectif de la neutralité carbone selon RTE. Le troisième envisage un contexte économique dégradé rendant peu probable l'atteinte de cet objectif de décarbonation. Les scénarios proposent trois fourchettes pour la consommation intérieure d'électricité en 2035 (par rapport aux 475 térawatt-heures [TWh] de 2022) : 580 à 640 TWh dans le premier, 550 à 600 TWh dans le deuxième, et 525 à 535 TWh dans le troisième.

RTE rappelle que la stratégie d'électrification devra utiliser quatre leviers : la sobriété dans les consommations, l'efficacité énergétique, la production avec des énergies renouvelables d'une part, et le nucléaire d'autre part. Il estime que des économies sont possibles et fait également des prévisions sectorielles sur la consommation. Ainsi, les deux premiers scénarios permettraient de limiter la consommation d'électricité, grâce à une sobriété des consommateurs et au progrès de l'efficacité énergétique contribuant à des économies respectivement de 85 TWh, et au minimum de 75 TWh / au maximum de 100 TWh dans les deux premiers scénarios. S'agissant de la production électrique, RTE préconise une contribution importante des énergies renouvelables (120 TWh aujourd'hui), d'au

minimum de 270 TWh en 2035 et si possible de 320 TWh, avec différents panachages : hydraulique, solaire, éolien avec un effort sur la filière *offshore* où la France est en retard (une puissance installée de 0,5 gigawatt [GW]). Concernant le nucléaire, RTE donne priorité à un scénario de base prévoyant le maintien d'une puissance de 61 GW avec une production au minimum de 360 TWh et si possible de 400 TWh sans fermeture de réacteurs, ainsi que la mise en service du réacteur à eau pressurisée (EPR) de Flamanville (la Finlande a inauguré le sien début octobre...).

Le rapport consacre des développements importants aux facteurs de réussite de la politique d'électrification, estimant « qu'à court terme, le niveau de sécurité d'approvisionnement va s'améliorer » mais qu'à l'horizon 2030, des besoins de capacités additionnels vont émerger, qui peuvent être assurés par un pilotage de la consommation, des opérations de délestage par exemple, et de la production (il n'exclut pas la mise en réserve de deux centrales au charbon au cas où..., mais avec un recours possible à la biomasse), ainsi que par des moyens de stockage, par des batteries notamment. Le scénario volontariste de RTE mise aussi, d'une part sur le développement à grande échelle du chauffage avec des pompes à chaleur électriques (11,5 millions de logements chauffés de cette façon en 2035 contre un million en 2022), et d'autre part sur une très forte progression du parc de voitures électriques. Celui-ci pas-

## Indice de compétitivité de la production d'électricité en France dans la variante de référence du scénario « Accélération réussie » (en euros 2022 par MWh produit)



serait de 42 % à 38 % du parc en 2035, contre 1 % en 2022, et 23 % pour les camions — une part plus élevée que dans ses prévisions initiales grâce au progrès des batteries —, correspondant pour l'ensemble des transports à une consommation de 80 à 88 TWh.

RTE estime aussi que la France a la capacité de mettre en œuvre une production d'hydrogène par voie électrolytique, utilisable dans les transports (via des carburants ou des piles) et l'industrie, mais avec des incertitudes, notamment concernant son stockage. Celle-ci doit aussi électrifier ses procédés de production (passer de 29 % à près de 50 %). Une cinquantaine de sites industriels sont particulièrement ciblés car ils sont fortement consommateurs d'énergies fossiles : Dunkerque, Le Havre et Fos-sur-Mer.

RTE ne cache pas que les besoins d'investissements à court-moyen terme dans le système électrique

sont massifs (production, réseaux de transport, installations pour sécuriser l'approvisionnement et le stockage), probablement le triple de ceux de la période récente. Il les chiffre, hors réseaux, à 25-35 milliards d'euros par an pour les seules infrastructures de production et de flexibilité. Toutefois, RTE envisage que le coût de production d'électricité en France (80 euros le mégawatt-heure [MWh] en début de période et 72 euros le MWh en 2035 hors distribution et mesures de flexibilité, contre 70 euros le MWh en 2020-2021) soit en hausse modérée par rapport aux estimations de son rapport précédent. Mais le *mix* électrique français maintiendrait une forte compétitivité de l'électricité produite en France par rapport aux autres pays européens. L'interconnexion du réseau électrique français avec celui de ses voisins européens est nécessaire et, selon RTE, pour réussir la décarbonation de son économie,

la France « doit rester intégrée au marché européen, mais l'accompagner d'un cadre permettant aux consommateurs de bénéficier de la compétitivité des coûts de production ».

Avec ce bilan prévisionnel qui a l'avantage d'être clair, RTE présente, en quelque sorte, les enjeux d'un pari, ainsi que les moyens à mobiliser pour le gagner : réussir une nouvelle étape de l'électrification du pays qui constituera une rupture par rapport aux années précédentes. Il doit permettre d'accroître la souveraineté énergétique et industrielle de la France, tout en réduisant son déficit commercial. RTE considère que cette transition va probablement se déployer dans un contexte géopolitique et économique plus complexe que celui des années 2010 (tensions internationales, plus faible croissance économique, taux d'intérêt plus élevés, investissements publics sous tension). Il ne cache pas non plus qu'il comporte des risques économiques et des incertitudes techniques pour les filières. Dans l'hypothèse d'une « mondialisation contrariée », son

troisième scénario, la stratégie de décarbonation devra davantage s'appuyer sur une relocalisation de la chaîne de valeur, une diversification des approvisionnements et des options technologiques – options qui toutefois restent floues...

Il est vrai que l'Agence internationale de l'énergie (AIE), dans un rapport publié lui aussi en septembre <sup>2</sup>, conforte la position de RTE : elle estime qu'il est encore possible de limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C avec un scénario « zéro carbone » en 2050, en mobilisant des « énergies propres » avec les techniques disponibles, mais qu'il est urgent d'agir. Cette nouvelle étude de RTE complète utilement la longue liste des rapports sur la transition énergétique publiés depuis 2020, avec l'intérêt de montrer comment passer aux travaux pratiques pour l'électrification. ■

Pierre Papon

---

2. Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach: 2023 Update, Paris : AIE, septembre 2023. URL : <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>. Consulté le 15 novembre 2023.

# futuribles

N° 458 • January-February 2024

---

## Foresight on Mineral Insecurity

### Anticipating the New Metals Era of the Low Carbon Transition

*Emmanuel Hache*

The recent economic, Covid and geopolitical crises, coupled with the aims of the battle against climate change and the stakes involved, have substantially intensified the concerns of the European Union and its member states over their supply chains for certain products and materials. Though the first EU list of so-called critical materials dates to 2011, concerns over access to resources go back further than that, as Emmanuel Hache reminds us at the beginning of this article, particularly in the USA. Nevertheless, the increasingly shrill alarms over planetary limits and the specific needs of the key sectors of the ecological and digital transitions confer a highly strategic role on various minerals, metals and materials, most of which are produced outside Europe. These strategic raw materials, which are indispensable for the current transitions, could shake things up internationally and are at the heart of the EU's thinking in terms of industrial sovereignty and a low-carbon development trajectory.

Hache shines a light on this 'mineral insecurity' with a very clear situational analysis of the supply conditions for these strategic raw materials and the EU's level of dependency. He stresses 'how fragmented the world has become' and the way trade is organized

between the countries that produce and consume these critical materials: the new alliances, the related risks and advantages, the environmental and social challenges around strategic mineral exploitation, and a number of elements that have not yet been properly thought through (such as voluntary self-restraint). Lastly, he suggests four scenarios for how the EU's attitude to this insecurity of supply may evolve, depending, on the one hand, on the social acceptability of mining projects on its own territory and, on the other, on the degree of cartelization of the global market for raw materials.

---

## Society and the Challenge of Scientific and Technological Advances

### The Case of Artificial Intelligence and Genetics

*Virginie Courtier-Orgogozo and Laurence Devillers*

Scientific and technological progress regularly makes media headlines, as can be seen, for example, from the many articles on advances in Artificial Intelligence (AI), particularly since the launch of the famous ChatGPT in late 2022. And yet, with only anecdotal material on how a chatbot like ChatGPT can be used and no challenging coverage of the questions raised by its uses in everyday life, are individuals really well-informed – informed enough – about this new technology of AI? Do they have a clear, precise vision enabling them to take a view of the

many major issues it raises? The same applies in the field of genetics: do we know precisely what point research has reached and what potential applications might ensue in the coming years (including thanks to AI)?

In these two scientific fields with major implications for our future, we are admittedly informed — as we are in many other areas — though at times in only a fragmentary, incomplete way and with little awareness of a number of precautions that happen to be essential. Given common misconceptions, and in an effort to put individuals at ease with a science they are at times inclined to distrust, it is essential to provide them with precise keys to understanding, to tell them what is known (or not) about developing technologies and to lay out the issues and limitations for them in as educative a way as possible. If that is done, they will be equipped with an informed, rather than a mystified, sense of the societal issues around these technologies. In this article, researchers Virginie Courtier-Orgogozo and Laurence Devillers explore these issues of public information through examples of the advances in genetics and AI, and offer pathways for 'better equipping the general public to deal with scientific and technological progress.'

---

## The Oppenheimer Enigma

*Jean-Pierre Dupuy*

There have been three notable nuclear-weapons-related events in recent months. The first concerns the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons (NPT), which was agreed in 1968, came into force on 5 March 1970 and was ratified by a large number of countries. 'Considering the devastation that would be visited upon all mankind by a nuclear war', the parties

agreed to prevent the 'diversion of nuclear energy from peaceful uses to nuclear weapons', to act to counter the spread of nuclear weapons and to take effective measures 'in the direction of nuclear disarmament' and the maintenance of peace. However, Russia, after invading Ukraine and settling into a long-term war there, while threatening the Atlantic Alliance on several occasions with the use of atomic weapons, has decided to leave the NPT.

The second event was the release in July 2023 of Christopher Nolan's film *Oppenheimer*, which has been immensely successful in France, as shown by the box office figures (in excess of 4 million by November, according to Box Office France). The third is the publication of an updated and expanded paperback edition of Jean-Pierre Dupuy's *The War That Must Not Occur* (Redwood : Stanford University Press, 2023), which takes the view that 'we are closer to nuclear war than we have ever been'. Dupuy offers his take on Nolan's film here, putting into proper context the portrayal of the physicist Robert Oppenheimer (1904-1967), director of the Manhattan Project that led to the development of the atom bomb.

---

## The Dynamics of Scientific Publication: the French Case

*Agénor Lahatte  
and Frédérique Sachwald*

As expectations from innovation rise in a context of digital and ecological transition, and increased international tensions revive research competition, how do things stand with France? With a substantial scientific heritage and a longstanding presence at the forefront of global science, its knowledge production currently seems less

dynamic in a very demanding international context. At the national level, researchers are expressing difficulties, from both lack of resources and the complexities of the research system.

Drawing on the most recent figures from the French Science and Technology Observatory (OST), Agéonor Lahatte and Frédérique Sachwald shine a light on the comparative dynamics of the nation's scientific publication since 2010. They outline how these international comparisons are made and go on to analyse various different indicators among the highest-ranking researchers and by individual discipline.

Though the overall figures are not alarming in themselves (with the rate of publication rising), the dynamics observed are worthy of attention. France seems only moderately involved in fields that are growing fast at the global level (such as computer science, including artificial intelligence) or the largest fields for publication (e.g. chemistry). Conversely, its involvement remains high in relatively undynamic disciplines (physics, mathematics, human sciences). These combined developments might easily result in France becoming estranged from strategic areas. The trends identified in this article will have to be fleshed out precisely by complementary analyses, but they already enable us to grasp the general trajectory of the French research system and contribute to thinking about how it is developing.

to construct analyses and serve as a basis for projections is a key one. Many indicators are imperfect, as can be seen from the recurrent discussions on the creation of wealth, or on the measurement of a country's national income, which we know to be inadequate for estimating its population's well-being. But even beyond the nature of the indicators selected, the question of the pertinence of the comparisons to be made from them in both time and space is another focal issue that gets little attention. Yet, as is demonstrated here by Jean Baneth, an economist and former director of the World Bank's International Economics Department, we must be cautious about this and not make statistics say more than they can. His article explains that the conclusions of such statistical comparisons may vary substantially, depending on the methodology used to calculate price indices for the purpose of making comparisons over time or between countries, on the mode of comparison adopted for the prices of goods or income levels (nominal levels or purchasing power parity), and even on the level of quality of goods compared. In this article Baneth presents a number of subtleties (if not, indeed, biases) to be found in the interpretation of statistical comparisons, so as to provide those who use them with some clues for avoiding the pitfalls attaching to them or, at the very least, for being aware of their limits.

---

## Statistical Comparisons in Time and Space

The Virtues and Limitations of Data

*Jean Baneth*

When thinking about the future, the question of the indicators used

---

## Marcel Boiteux Was Right

Competition in Electricity Supply Pushes up Prices

*Lionel Taccoen*

On 6 September 2023, Marcel Boiteux died at the age of 101. As chairman

of EDF for 20 years and a member of the French Academy of Moral and Political Sciences for 30 (and at one point its president), his was a voice that was heeded and respected in the energy sector. He even lent his name to a prize awarded annually by the Association of Energy Economists. In this 'Future of Yesteryear' article, Lionel Taccoen pays tribute to him, reminding us how far-sighted it was of him to warn our readers in 2007 against too much blind faith being put in free-market thinking by the European authorities when they decided to open up the electricity market to competition. Returning to the arguments advanced by Boiteux in his article, Taccoen stresses their current relevance (reinforced by the various crises afflicting Europe and the world over the last four years), writing that 'Marcel Boiteux was right'. He was, perhaps, too far ahead of his time, but his experience at the helm of EDF had shown him that electricity wasn't a commodity like any other, and that the public utilities and electricity tariffs would not be well served — far from it — by deregulation. Users will probably continue for many years yet to pay the price for this unfortunate reform of the electricity market.

---

## Is Europe Fragile?

*Jean-François Drevet*

Rocked, externally, by the return of armed conflict to European soil in the form of the Ukraine-Russia war, and

also, on the other side of the Mediterranean, by the Israel-Gaza conflict, in late 2023, and just a few months ahead of its next parliamentary elections, the European Union is experiencing a situation unprecedented since the end of the Cold War more than 30 years ago. The EU was built on a policy of small steps forward, broadly focussed on the economic and trade spheres (so far with good results), but it is struggling to change gear and come up with common policies in the areas where its member states are keen to retain their sovereignty (migration, currency, fiscal policy etc.). Moreover, with successive enlargements taking the number of members to 27, the practicalities of its decision-making processes, particularly in the Council, mean that it has become very complicated to arrive at agreements.

Is this situation weakening the EU and, if so, to what extent? Is it at the end of the road when it comes to economic and political integration? In this European Chronicle, Jean-François Drevet examines the EU's fragilities in five key areas: the single market, budget policy, migration policy, the single currency and a common foreign policy. 'Things have not turned out as well as they might have', he writes in his conclusion, but the extremely turbulent context in which Europeans now operate requires increased (re-)commitment to common action by the countries of the EU and a clearer statement of their belonging to a shared entity. ■

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

**Chief Editor:** Hugues de Jovenel

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

## VIENT DE PARAÎTRE

### Rapport Vigie 2023

308 pages • Prix public : 144 euros

Futuribles International consacre son dernier *Rapport Vigie* aux transformations anthropologiques des sociétés occidentales à l'horizon 2040-2050 : transformations dans les relations qu'elles entretiennent avec leur environnement, avec les êtres humains et non humains, vis-à-vis de la naissance, de la mort, du savoir et des institutions, ou encore du temps.



### Êtres humains, être humain en 2050. Imaginaires, sociétés, individus en Occident

Rapport réalisé par l'équipe de Futuribles  
sous la direction de Cécile Désaunay et Marie Ségur

Chapitre 1. **Vivant** : de la domination à la réconciliation ?  
*Cécile Désaunay*

Chapitre 2. **Territoires** : vivre ici, rêver d'ailleurs ?  
*Quentin Bisalli*

Chapitre 3. **Naissance et mort** : la biologie sous contrôle ?  
*Marie Ségur*

Chapitre 4. **Technologies** : machines humaines, trop humaines ?  
*Pierre-Antoine Marti*

Chapitre 5. **Genre et sexes** : de l'assignation à la fluidité ?  
*Marie Ségur*

Chapitre 6. **Savoirs et institutions** : qui croire ? Que croire ?  
*Yannick Blanc, Cécile Désaunay et Marie Ségur*

Chapitre 7. **Crises et temporalités** : de l'accélération à l'éco-anxiété ?  
*François Bourse, avec Cécile Désaunay et François de Jouvenel*

Le *Rapport Vigie 2023* est gratuit pour les membres de l'association Futuribles International.  
Devenir membre : <https://www.futuribles.com/devenez-membre-de-futuribles-international/>  
Acheter le rapport : <https://boutique.futuribles.com/common/categories/6>

Information-contact : Aude Houguenague • E-mail : [ahouguenague@futuribles.com](mailto:ahouguenague@futuribles.com)  
Tél. : + 33 (0)1 53 63 37 73 • Site Internet : <https://www.futuribles.com/>

# futuribles

L'anticipation au service de l'action

Janvier-février 2024 • numéro 458

- 3 | **Éditorial**  
Quelles ressources pour demain ?  
*Hugues de Jouvenel*
- 5 | **Prospective de l'insécurité minérale**  
Anticiper la nouvelle ère métallique de la transition bas-carbone  
*Emmanuel Hache*
- 25 | **La société face aux avancées des sciences et des techniques**  
Le cas de l'intelligence artificielle et de la génétique  
*Virginie Courtier-Orgogozo et Laurence Devillers*
- 45 | **Tribune**  
L'énigme Oppenheimer  
*Jean-Pierre Dupuy*
- 53 | **Dynamique des publications scientifiques : le cas de la France**  
*Agénor Lahatte et Frédéric Sachwald*
- 73 | **Comparaisons statistiques dans le temps et l'espace**  
Vertus et limites des données  
*Jean Baneth*
- 87 | **Futurs d'antan**  
Marcel Boiteux avait raison  
La concurrence en électricité augmente les prix  
*Lionel Taccoen*
- 95 | **Chronique européenne**  
L'Europe est-elle fragile ?  
*Jean-François Drevet*
- 103 | **Actualités prospectives**  
Ce que révèle le prix du Big Mac sur l'inflation | L'exploitation minière des fonds marins sur la sellette | Chine / États-Unis : fin et leçons de la guerre des puces | E-carburants : quel apport à la décarbonation du transport ? | Droit de la propriété intellectuelle et IA.
- 117 | **Lu, vu, entendu**  
Daniel Andler, *Intelligence artificielle, intelligence humaine : la double énigme* | Collectif, « Quelle université voulons-nous ? » | Ophélie Coelho, *Géopolitique du numérique. L'impérialisme à pas de géants* | Didier Billion et Christophe Ventura (sous la dir. de), « Vers une désoccidentalisation du monde ? » | RTE, *Bilan prévisionnel, édition 2023. Futurs énergétiques 2050 → 2023-2035 : première étape vers la neutralité carbone.*
- 133 | **Abstracts**

L 15817 - 458 - F: 22,00 € - RD



978-2-84387-473-4

