



les *CAHIERS*
du Cercle
des économistes

Sous la direction de
Jean-Hervé Lorenzi

**LA FRANCE
EST-ELLE TOUJOURS
DANS LA COURSE
TECHNOLOGIQUE ?**

Avec les contributions de

François Barrault

Véronique Bellon-Maurel

Françoise Benhamou

Bernard Bigot

Anne Bouverot

Elie Cohen

Mathieu Duchâtel

Lionel Fontagné

André Loesekrug-Pietri

Jean-Hervé Lorenzi

Denis Lucquin

Valérie Mignon

Mathieu Noguès

Tanya Perelmuter

Isabelle Piot-Lepetit

Erwann Tison

Alain Trannoy

Guy Turquet de Beauregard

Claire Waysand

Sommaire

État des lieux de la France (Mathieu Noguès)	5
--	---

Quelles sont les technologies d'avenir ?

Résilience stratégique et politiques industrielles : le cas des semi-conducteurs (Mathieu Duchâtel)	15
---	----

L'intelligence artificielle, une question de confiance (Anne Bouverot et Tanya Perelmuter)	22
--	----

Le numérique : levier de l'agriculture durable (Véronique Bellon-Maurel et Isabelle Piot-Lepetit)	29
---	----

IOT, 5G, IA, Processeurs Quantiques, tout s'accélère... en route vers le futur (François Barrault)	36
--	----

ITER et la fusion de l'hydrogène, un atout économique décisif ? (Bernard Bigot)	43
---	----

Energie, grand projet et technologies (Guy Turquet de Beauregard).	50
--	----

L'avenir des biotechs françaises passe-t-il par un Nasdaq européen ? (Denis Lucquin)	58
--	----

Comment développer de grands projets technologiques aujourd'hui ?

Le renouveau technologique passe par des Pôles de compétitivité (Jean-Hervé Lorenzi)	65
--	----

L'avenir de la France comme grande nation scientifique (Alain Trannoy)	69
--	----

Financement de la recherche en France : un focus sur le système universitaire français (Valérie Mignon)	76
Les innovations, les ménages, les entreprises et l'ambition de l'État : une nouvelle répartition à définir (Erwann Tison)	83
Quelles priorités technologiques pour l'autonomie stratégique européenne ? (André Loesekrug-Pietri)	90
France et systèmes nationaux d'innovation (Elie Cohen)	100

Répondre aux enjeux d'aujourd'hui

Climat – énergie, la technologie peut-elle répondre à tout ? (Claire Waysand)	112
Quelques leçons à tirer du débat sur la 5G (Françoise Benhamou)	119
Comment réindustrialiser la France ? (Lionel Fontagné)	126
Auteurs	132

État des lieux de la France

Mathieu Noguès

1. L'état général de la recherche et développement en France

Position scientifique de la France

- La France se classe au 13ème rang mondial et au 7ème rang de l'Union Européenne en termes de dépenses de recherche et développement, avec 2,2% de son PIB qui y sont consacrées. Elle se situe en-deçà de la moyenne de l'OCDE, qui est de 2,5% du PIB. [OCDE]
- Selon l'Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle, la France est au 12ème rang mondial de son Indice Mondial de l'Innovation, et au 6ème rang de l'UE. Selon cet indice, qui regarde l'innovation dans les pays en fonction de leur environnement politique, l'éducation, les infrastructures et le perfectionnement des entreprises, la France a gagné 4 rangs par rapport à l'année précédente, notamment grâce à une amélioration dans les applications de la recherche. [Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI)]
- La France présente un profil de recherche assez équilibré entre domaines technologiques parmi les brevets déposés à l'OEB, avec une spécialisation dans le transport, ainsi que dans la chimie organique fine et les éléments mécaniques dans une moindre mesure. [Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI)]

Présence et qualité de la recherche

- La France se classe au 6ème rang mondial en nombre de publications scientifiques, avec plus de 85 000 publications en 2018, derrière le Japon (91 000), l'Allemagne (127 000), le Royaume-Uni (143 000) et surtout la Chine (430 000) et les États-Unis (464 000). Parmi ces publications, 62,5% sont des co-publications internationales, ce qui la place au 3ème rang mondial. Ces co-publications sont essentiellement effec-

tuées avec les États-Unis (26,9%), le Royaume-Uni (19,6%) et l'Allemagne (18,6%). [MESRI]

- Selon l'Indice Global d'Innovation, la qualité de la recherche est une force de la France, où elle se classe au 9^{ème} rang mondial. Cet indice regroupe la qualité des publications, des brevets et des universités. En particulier, elle est le 5^{ème} pays au monde en termes de reprise à l'international de publications nationales. [OMPI]

- La place des universités dans les classements mondiaux reste une faiblesse de la France, bien qu'elle s'améliore. La France positionne trois universités dans le top 50 selon le classement de Shanghai (Paris-Saclay, 14^{ème}, Paris Sciences et Lettres, 36^{ème}, Sorbonne, 39^{ème}), une seule selon le classement du Times (Paris Sciences et Lettres, 46^{ème}) et aucune selon le classement QS. [Academic Ranking of World Universities, Times World University Rankings, QS Top Universities]

- La France place trois pôles parmi le top 100 mondial dans les sciences et technologies, Paris (10^{ème}, premier pôle européen), Lyon (76^{ème}) et Grenoble (92^{ème}), à quoi il faut ajouter les pôles élargis de Lausanne (89^{ème}) et Bâle (95^{ème}). [OMPI]

2. La recherche et innovation dans les entreprises

Innovation et entreprises

- Les dépenses de recherche et développement des entreprises en France s'élèvent à 1,4% du PIB, ce qui la place sous la moyenne de l'OCDE, elles-mêmes de 1,7% du PIB. Parmi les autres grands pays innovants, la Chine est à 1,7% également, les États-Unis à 2%, l'Allemagne à 2,1% et la Corée du Sud à 3,6%. [OCDE]

- En 2016, 20% des entreprises françaises déclarent avoir développé des innovations de produits et 24% des innovations de procédés. En plus de ces innovations technologiques, 42% des entreprises ont également développé des innovations d'organisation ou de marketing. [MESRI]

- Les secteurs présentant le plus d'entreprises innovantes sont les secteurs de l'information et la communication (73% des entreprises du secteur), l'industrie manufacturière et extractive (59%) et les activités spécialisées, scientifiques et techniques (59%). [MESRI]

Innovation des entreprises par taille

- Les grandes entreprises effectuent 58% des dépenses de R&D en 2017, contre 24% pour les entreprises de taille intermédiaire (ETI) et 18% pour les petites et moyennes entreprises (PME). Les ETI bénéficient toutefois d'un soutien public direct à la R&D trois fois inférieur aux PME ou aux grandes entreprises en termes relatifs. [MESRI]

- L'intensité technologique des dépenses de R&D est croissante selon la taille des entreprises. Seulement 15,1% des dépenses d'innovation des microentreprises concernent des innovations en moyennes et hautes technologies, contre 27,5% pour les PME, 57,9% pour les ETI et 72,2% pour les grandes entreprises. [MESRI]

- La France se positionne au 16ème rang en termes d'investissements en capital-risque rapporté au PIB, soit au 5ème rang de l'UE. L'Europe compte 29 licornes, dont 7 en France, largement derrière la Chine (227) et aux États-Unis (233). [OMPI] [Hurun Global Unicorn Index]

Coopération entre recherche publique et privée

- Entre 2014 et 2016, en France, 14% des sociétés technologiquement innovantes ont coopéré avec des universités ou des établissements d'enseignement supérieur et 11% avec des organismes gouvernementaux ou publics de recherche. [MESRI]

- Cette coopération public-privé française est plus élevée que la moyenne de l'Union Européenne (respectivement à 12,8% et 8,4%), mais loin derrière l'Allemagne (à 27,3% et 20,7%). [MESRI]

- Avec 2,5% de co-dépôts de brevets publics-privés à l'Office Européen des Brevets en 2016, la France est en tête du podium international. [MESRI]

3. Les ressources humaines de la recherche

Chercheurs et doctorants

- La France compte 10 chercheurs pour 1 000 actifs en 2017, ce qui est proche de l'Allemagne (9,7), mieux que le Royaume-Uni (8,7) et les États-Unis (8,5) et l'OCDE en général (7,7). Ce ratio reste moins élevé qu'en Suède (13,6), en Corée du Sud (13,9) ou au Danemark (15). [OCDE]

- Les chercheurs se concentrent dans les industries manufacturières (110 425 équivalents temps plein (ETP)) dont l'industrie automobile (19 315 ETP). Les services comptent 64 197 ETP, dont 20 906 dans les activités informatiques et services d'information, et 21 946 dans les activités spécialisées, scientifiques et techniques. [MESRI]

- Concernant le niveau de qualification, 56% des chercheurs en entreprises sont titulaires d'un diplôme d'ingénieur, 17,3% d'un master, d'un Diplôme d'Études Approfondies (DEA) ou d'un Diplôme d'Études Supérieures Spécialisées (DESS) et 12,3% d'un doctorat. [MESRI]

- Le nombre de doctorants est en constante baisse depuis 2009, passant de 81 243 à 71 159 en 2018. Le taux d'insertion des doctorants dans l'emploi 3 ans après l'obtention du diplôme est de 90,8%, mais seulement de 65,6% dans un emploi stable. Le secteur académique recrute la moitié des docteurs, ce qui en fait le premier employeur. Ils se tournent ensuite majoritairement vers le secteur privé (32%) et le public hors secteur académique (19%). [MESRI]

Attractivité internationale

- Trois ans après l'obtention d'un doctorat, près d'un docteur français sur cinq est en emploi à l'étranger. [MESRI]

- En 2018, le nombre d'étudiants étrangers en mobilité internationale atteint 283 700 dans l'enseignement supérieur français, soit une hausse de 18,8% entre 2013 et 2018. [MESRI]

- À l'université, la proportion d'étudiants en mobilité internationale croît avec le degré d'étude : 9% en cursus licence, 16% en cursus master et 40% en doctorat. [MESRI]
- Paris a figuré en tête du classement des meilleures villes étudiantes publié par QS de 2014 à 2016, mais se classe 7ème en 2019. Ce classement prend en compte le classement des universités, la perception des étudiants, l'attractivité de la ville, la dynamique d'emploi et l'accessibilité économique des universités et de la ville. [QS Best Student Cities]

4. L'Europe et la technologie

Budget européen et plan de relance NextGenerationEU

- Parmi les 546,5 milliards d'euros mobilisés par le « Plan Juncker » depuis 2015, 34% ont été mobilisés pour les entreprises de petite dimensions, 26% pour la recherche, développement et innovation, 15% pour l'énergie, 9% pour les technologies numériques, 6% pour les transports, 5% pour les infrastructures sociales, 4% pour l'environnement et l'utilisation efficace des ressources et 1% pour la bioéconomie. [Banque Européenne d'Investissement]
- De 2021 à 2027, l'Union Européenne dispose d'un budget de long terme de 1 824 milliards d'euros, composés du budget de long terme de l'UE (le Cadre Financier Pluriannuel, 1 074 milliards d'euros) et du plan de relance face à la crise « NextGenerationEU » (750 milliards d'euros). [UE 1]
- La moitié du budget soutiendra la modernisation à travers la recherche et l'innovation (notamment via Horizon Europe), des transitions climatique et numérique équitables (Fonds pour une transition juste, Programme pour une Europe Numérique) et la préparation, la reprise et la résilience (Facilité pour la reprise et la résilience rescEU, EU4Health). [UE 1]

Plan de recherche, développement et innovation Horizon Europe

- Le programme-cadre de l'Union européenne pour la recherche et l'innovation pour la période allant de 2021 à 2027, « Horizon Europe », est financé par l'UE à hauteur de 84,9 milliards d'euros. Ces fonds sont répartis en quatre piliers dont le principal concerne les problématiques mondiales et la compétitivité industrielle européenne (56% du budget), à savoir la santé, le numérique, l'industrie, ainsi que l'alimentation, la bioéconomie et les ressources naturelles. Les trois autres piliers portent sur l'excellence scientifique (27%), l'Europe innovante (13%) et l'élargissement de la participation et le renforcement de l'espace européen de la recherche (4%). [Horizon Europe]

- Dans le programme Horizon 2020, prédécesseur d'Horizon Europe de 2015 à 2020, la France a maintenu sa 3ème place historique parmi les pays bénéficiaires, à 5,2 milliards d'euros, soit 11,1% des financements alloués, derrière l'Allemagne (14,8%) et le Royaume-Uni (13,1%). [MESRI]

- La France occupe une place prépondérante dans les projets de recherche d'Horizon 2020 dans le nucléaire, le transport et l'espace. [MESRI]

- L'Allemagne reste le premier partenaire de la France dans Horizon 2020, avec des collaborations franco-allemandes dans 7 projets sur 10 impliquant des équipes françaises. [MESRI]

PIIEC - Projets Importants d'Intérêts Européen Commun

- Les PIIEC sont les projets transnationaux d'importance stratégique européens, pouvant bénéficier d'aides européennes. Ils peuvent apporter une contribution très importante à la croissance économique, à l'emploi et à la compétitivité de l'industrie et de l'économie de l'Union Européenne, compte tenu de leurs répercussions positives sur le marché intérieur et la société européenne. [UE 2]

- En 2019, l'UE a mis en place un PIIEC dans les batteries, qu'elle a doté de 3,2 milliards d'euros en 2019, et rehaussé à 5,1 milliards d'euros en 2021. La Commission européenne s'attend à ce que ces fonds publics permettent de lever 9 milliards d'euros supplémentaires provenant du secteur privé. Ce PIIEC couvre l'ensemble de la chaîne de valeur des batteries, depuis la recherche fondamentale au recyclage, en passant par l'application aux véhicules électriques notamment, et mobilise 12 pays de l'UE, dont la France. [UE 3, 4]
- Dans la microélectronique, l'UE a lancé un PIIEC de 1,75 milliard d'euros en soutien public avec pour objectif de mobiliser 6 milliards d'euros d'investissements privés supplémentaires, d'ici 2024. Ce PIIEC a été notifié par la France, l'Allemagne, l'Italie et le Royaume-Uni. [UE 5]
- La volonté de développer des PIIEC dans d'autres domaines a été exprimée par la France, notamment dans le cloud industriel, les composants et les systèmes électroniques, l'hydrogène, l'espace, l'intelligence artificielle et la santé. [Commissaire Européen au Marché Intérieur] [Ministère de l'Economie, des Finances et de la Relance 1, 2]

Annexe - Sources

- Academic Ranking of World Universities, "Academic Ranking of World Universities 2020", 2021
- Banque Européenne d'Investissement, « Les chiffres du groupe BEI au 31.12.2020 », janvier 2021
- Commissaire Européen au Marché Intérieur T. Breton, « Les secteurs clés de la réindustrialisation européenne », interview lors de l'événement « Va-t-on vraiment réindustrialiser la France ? » organisé par le Cercle des Économistes, février 2021
- Horizon Europe, « Présentation du programme Horizon Europe », 2021
- Hurun Global Unicorn Index, "Hurun Global Unicorn In-

dex 2020", 2021

- Ministère de l'Économie, des Finances et de la Relance 1, « Communiqué de presse de Bruno Le Maire et Peter Altmaier », CP n° 674, février 2021
- Ministère de l'Économie, des Finances et de la Relance 2, « Communiqué de presse La France pose les premiers jalons visant au renforcement d'une filière industrielle française et européenne de la Santé avec le lancement d'un Appel à manifestation d'intérêt (AMI) dans le cadre d'un Projet important d'intérêt européen commun (PIIEC) », CP n° 614, janvier 2021
- Ministère de l'Enseignement Supérieure, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI), « L'Etat de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation en France », n° 13, Mai 2020
- Organisation de Coopération et de Développement Économique (OCDE), « Science, technologie et innovation: Tableau de bord de l'OCDE », 2021
- Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI), "Global Innovation Index 2020 - Who Will Finance Education?", Cornell University, INSEAD & OMPI, 2020
- QS Best Student Cities, "Best Student Cities 2019", 2020
- QS Top Universities, "QS World University Rankings® 2021", 2021
- Times World University Rankings, "World University Rankings 2021", 2021
- Union Européenne 1, "Recovery plan for Europe", 2021
- Union Européenne 2, « Communication de la Commission, Critères relatifs à l'analyse de la compatibilité avec le marché intérieur des aides d'État destinées à promouvoir la réalisation de projets importants d'intérêt européen commun », Journal officiel de l'Union européenne, juin 2014
- Union Européenne 3, « Aides d'État: la Commission autorise une aide publique de 3,2 milliards € accordée par sept États membres pour un projet paneuropéen de recherche et d'innovation dans tous les segments de la chaîne de valeur

des batteries », communiqué de presse, décembre 2019

- Union Européenne 4, « Aides d'État: la Commission autorise une aide publique de 2,9 milliards d'euros accordée par douze États membres pour un deuxième projet paneuropéen de recherche et d'innovation portant sur l'ensemble de la chaîne de valeur des batteries », communiqué de presse, janvier 2021

- Union Européenne 5, « La Commission autorise le projet de la France, de l'Allemagne, de l'Italie et du Royaume-Uni d'accorder un soutien public de 1,75 milliard d'euros à un projet conjoint de recherche et d'innovation dans le domaine de la microélectronique », communiqué de presse, décembre 2018

Quelles sont les
technologies
d'avenir ?

01

Résilience stratégique et politiques industrielles : le cas des semi-conducteurs

Mathieu Duchâtel

Les récentes pénuries de semi-conducteurs ont mis en lumière la grande vulnérabilité de cette industrie à la compétition géopolitique. Le défi est en effet plus profond que le simple dérèglement des rythmes de production engendré par la pandémie de COVID-19. Ce marché subit de plein fouet la pression des relations sino-américaines, avec ce chiffre éloquent : en 2019, Huawei a dépensé 23 milliards de dollars pour se constituer des stocks de semi-conducteurs, pesant ainsi sur le marché mondial. De tels efforts s'inscrivent dans la nécessité pour l'entreprise chinoise d'anticiper l'aggravation des restrictions d'accès aux technologies étrangères dont elle a effectivement fait l'objet, à l'été 2020, de la part de l'administration Trump.

Au-delà de ce coup de projecteur qu'ont permis les pénuries du début de l'année 2021, les semi-conducteurs sont bel et bien aux fondements de l'électronique d'aujourd'hui et de demain. Ils sont essentiels à l'économie du pur numérique - un rôle accéléré sous l'effet des transformations engendrées par la 5G (smartphones, cloud, internet des objets) - mais aussi à de nombreux autres secteurs aux mutations rapides et à forte valeur ajoutée, comme l'industrie automobile ou l'industrie de l'armement. Or il s'agit d'une chaîne de production très globalisée, dont l'interdépendance étroite servait il y a encore peu de temps les intérêts de tous les acteurs, mais qui connaît aujourd'hui de fortes tensions sous l'effet de deux forces contraires : les puissantes politiques industrielles chinoises d'une part, qui cherchent à réduire la dépendance du pays aux technologies et à la propriété intellectuelle

étrangères, et les restrictions américaines sur les transferts de technologies d'autre part (contrôle des exportations, filtrage à l'investissement, contrôle des échanges en matière d'éducation et de recherche).

Cette dynamique sino-américaine, sur fond de transformation numérique, intensifie les besoins industriels en semi-conducteurs. Ce contexte soulève pour la France un enjeu de positionnement stratégique et des questions de politique industrielle, qui se posent dans un cadre national mais surtout à l'échelon européen.

Les ambitions chinoises

A force d'investissement public et de planification, la Chine est parvenue à se hisser dans le top 6 mondial de cette industrie de pointe. Aujourd'hui, l'ensemble du secteur chinois doit répondre à une vision, celle de la « stratégie de développement centrée sur l'innovation », réaffirmée au 5^e Plénum du 19^e Comité central du Parti, et que l'on a récemment retrouvée au cœur du 14^e plan quinquennal (2021-2025). Les ambitions chinoises en matière de semi-conducteurs ne datent pas d'hier, avec des plans formulés dès les années 1950. Ce n'est cependant qu'en 2014 que l'objectif de faire de la Chine le leader mondial en la matière apparaît dans les documents officiels. Le plan le plus connu, « Made in China 2025 », aujourd'hui passé sous silence, fixait comme objectif d'atteindre 70% de la production de semi-conducteurs réalisée en Chine à l'horizon 2025 – elle n'en était encore qu'à 15% en 2020.

La réduction de la dépendance aux technologies étrangères n'est pas le seul lexique de la Chine. Jiang Jinqun, successeur de Wang Huning à la tête de l'École centrale du Parti (un bastion de pouvoir pour la formulation des politiques pu-

bliques), le dit avec clarté : « l'autosuffisance technologique est un choix inévitable ». Pourtant, les semi-conducteurs sont aujourd'hui le secteur pour lequel les ambitions chinoises sont les plus éloignées de la réalité de son industrie, tant de ses capacités manufacturières propres que de ses fondements scientifiques et technologiques.

En 2020, la Chine a importé l'équivalent de 380 milliards de dollars de semi-conducteurs, soit davantage que le total de ses importations de pétrole. Ce chiffre correspond à une augmentation de 25% par rapport à 2019, une hausse qui résulte en partie de l'effet Huawei et de la constitution de stocks par le pays. En outre, les importations d'équipement y ont augmenté de 20%, ce qui souligne les efforts menés par les industriels chinois pour alimenter leur propre capacité manufacturière, et leur dépendance en amont aux approvisionnements en provenance de ce que l'on pourrait baptiser le « bloc américain » : États-Unis, Taiwan, Japon, Corée du Sud et Europe. La Chine vient d'ailleurs d'annoncer, en mars 2021, la levée des taxes à l'importation pour les équipements et les matériaux de semi-conducteurs, ce jusqu'en 2030.

Pour stopper la course de la Chine, aucune mesure de restriction des transferts de technologie ne sera suffisante. Mais il est très improbable qu'elle parvienne à atteindre ses objectifs dans chacun des domaines constituant ensemble l'industrie des semi-conducteurs. Le leadership dans le haut de gamme paraît ainsi hors de portée. Pour accompagner sa transformation numérique, la Chine a besoin d'un accès aux semi-conducteurs gravés en 7 nanomètres et en deçà. Aujourd'hui, seuls TSMC - à Taiwan - et Samsung - en Corée du Sud - maîtrisent une telle technologie, dont la production est aujourd'hui presque entièrement absorbée par les smartphones haut de gamme. La demande excède l'offre, mais la Chine fait face à un goulet d'étranglement qu'il lui sera très difficile de contourner si les restrictions sont maintenues : pas

de gravure en 7, 5, 3 ou 2 nanomètres sans les machines de lithographie extrême ultra-violet du Néerlandais ASML, et pas de conception des circuits intégrés de ces générations sans les outils logiciels de conception assistée (EDA), dont la propriété intellectuelle est essentiellement américaine et, dans une moindre mesure, européenne (Siemens).

Le sursaut américain

L'une des premières décisions prises par l'administration Biden, en février 2021, est d'évaluer les vulnérabilités des chaînes d'approvisionnement des États-Unis en technologies critiques. A un horizon de 100 jours, le département du Commerce doit identifier, pour le secteur des semi-conducteurs, les risques pesant sur l'accès américain aux produits manufacturés et à leurs composants. Il ressortira de cet exercice des éléments de politique industrielle qui viendront soutenir la production aux États-Unis, un recalibrage des contrôles sur les transferts de technologie et des actions concertées avec les alliés.

Cette décision phare s'inscrit dans la continuité de l'administration Trump. En 2020, l'administration américaine mettait fin à un débat de 20 ans et tranchait alors pour un soutien fédéral de grande envergure à l'installation en Arizona de l'entreprise TSMC ; l'ambition est d'y construire la seule fonderie sur le sol américain qui gravera des circuits intégrés en deçà du seuil des 7 nanomètres. Exemption d'impôts sur les sociétés, facilités d'accès au terrain... si la valeur des mesures incitatives n'est pas communiquée, on peut les estimer en milliards de dollars. L'objectif est double. Tout d'abord, disposer d'une fonderie avancée sur le sol américain. Cet investissement permettra de renforcer un écosystème caractérisé par la domination américaine en amont de la chaîne de production, sur la conception des semi-conducteurs les plus avancés, et de réduire ainsi la vulnérabilité des États-Unis aux chocs ex-

térieurs. Ensuite, amorcer un changement de tendance plus large, puisque la part mondiale des États-Unis dans la production de semi-conducteurs est passée de 37% en 1990 à 12% en 2020 (à titre de comparaison, l'évolution en Chine s'est faite de 0 à 15%, en Europe de 44 à 9%).

Cette politique industrielle se déploie en complément d'un ensemble de mesures de restrictions à l'accès chinois aux technologies de semi-conducteurs, qui exploite cette vulnérabilité stratégique chinoise. Ce dispositif porte d'abord sur l'entreprise Huawei, et de manière plus large sur un système de désignation d'acteurs, avec une liste désignant des « entreprises militaires communistes » et qui instaure un système de licences d'exportation à portée extraterritoriale. Le dispositif vise à empêcher les transferts vers des usages finaux pressentis comme relevant du domaine militaire et liés aux violations des droits de l'Homme.

Mais l'administration américaine va au-delà d'une action qui serait seulement centrée sur la compétition militaire et les violations des droits de l'Homme. Le dispositif de transferts de technologie est de plus en plus explicitement mis au service de la compétition technologique avec la Chine. Alors que la politique américaine a cherché, avec succès, à maintenir un retard chinois de deux à trois générations dans les semi-conducteurs, elle ne sera efficace que si les alliés des États-Unis se joignent à cet effort.

Implications pour la France

A ce titre, l'Europe est incontournable car elle détient des technologies clefs (lithographie ASML, propriété intellectuelle logicielle). S'y déploie un écosystème de recherche et de développement créatif et qui permet l'émergence et l'épanouissement de start-ups, grâce à des fleurons comme l'IMEC, le CEA-LETI et Fraunhofer. Cet écosystème européen

a fait naître des industriels aux forces remarquables dans leurs applications pour l'industrie automobile (STMicroelectronics, Infineon, NXP). Ces entreprises sont pénalisées à des degrés divers par la compétition sino-américaine, même si la croissance de l'industrie automobile en Chine, un domaine non politique, leur offre malgré tout de belles perspectives sur le marché chinois.

Comment préserver et cultiver les forces européennes dans cet environnement caractérisé par un risque géopolitique accru sur les approvisionnements, et par une demande en croissance du fait de la transformation numérique ? Au niveau national comme au niveau européen, la France est contrainte de penser non seulement en termes de soutien à la recherche et au développement, mais aussi en termes de soutien à la capacité industrielle. Pour préparer l'avenir, trois axes apparaissent essentiels.

Tout d'abord, il s'agit de penser en termes de goulets d'étranglement et non en termes d'autonomie industrielle. L'interdépendance globale continuera d'être grignotée par les actions des États-Unis et de la Chine, mais sans que le principe général d'interdépendance ne soit entièrement abandonné au profit d'un découplage irréversible. Pour défendre ses intérêts dans une telle structure internationale, l'Europe doit détenir des positions de force. Défendre la lithographie extrême ultra-violet est possible en aidant son réseau de sous-traitants à accompagner la croissance d'ASML ; cultiver la propriété intellectuelle des entreprises européennes en matière de conception de circuits intégrés est une autre mesure essentielle.

Ensuite, il convient sans doute de continuer l'action nationale et européenne en soutien à la recherche et au développement sans oublier le volet défensif. 20% du plan de relance de l'UE sont fléchés vers la transformation numérique, et les

semi-conducteurs sont l'un des sept secteurs prioritaires. L'industrie française peut aujourd'hui tirer parti du plan Nano 2022, volet français du « projet important d'intérêt commun européen » (IPCEI) sur la nanoélectronique. Ce plan permet de diriger 1,1 milliard d'euros d'argent public vers les projets innovants de 7 entreprises. Si le soutien à la R&D en Europe est une réalité indiscutable, la question qui se pose aujourd'hui est davantage celle de la protection et de l'industrialisation des fruits de cette R&D. La question soulevée par les Etats-Unis (mais aussi par le Japon) quant aux régimes de contrôle sur les transferts de technologie en soutien à la compétitivité fait ricochet en Europe. L'enjeu de la recherche fondamentale n'en est pas absent.

Enfin, en juillet dernier, le commissaire Thierry Breton formulait l'idée d'une « manufacture avancée, vers la gravure en 2 nanomètres », idée aujourd'hui soutenue par 17 ministres des Télécommunications de l'UE. Il convient aujourd'hui pour l'Europe de trancher cette question et de prendre clairement position. Une fonderie qui franchirait le seuil critique des 7 nanomètres serait un projet titanesque, dont l'investissement en capital dépasserait la vingtaine de milliards d'euros. Nul doute que les bénéfices d'un tel projet en matière d'écosystème industriel, de soutien à la transformation numérique et son impact pour la future stature de nos industries d'armement seraient considérables. Or l'Europe ne peut probablement pas se passer des capacités de Samsung ou de TSMC, voire d'Intel si le géant américain monte en gamme. La France et l'Europe doivent explorer le recours possible à un deuxième projet important d'intérêt commun européen pour faciliter l'implantation d'une fonderie avancée dans un des Etats membres. L'ambition politique peut être un moteur de changement et les mesures d'incitation fiscale seront importantes, mais la décision finale reposera sur un calcul de rentabilité de la part de l'entreprise concernée.

02

L'intelligence artificielle, une question de confiance

Anne Bouverot et Tanya Perelmuter

L'intelligence artificielle fait déjà partie de notre vie quotidienne, par exemple pour les recommandations de musique ou de lectures que nous recevons sur internet, mais aussi pour la traduction automatique de textes, la lutte contre la fraude financière ou l'optimisation de la consommation d'énergie. Dans le domaine de la santé, les algorithmes peuvent désormais aider à prédire l'évolution de la maladie d'Alzheimer, à lire les mammographies ou à concevoir de nouveaux médicaments. Ces usages ne font que s'accélérer avec l'épidémie de Covid qui fait progresser le télétravail, les achats en ligne, les téléconsultations et les consommations de contenus numériques. Cependant, l'intelligence artificielle suscite de vives craintes, ne serait-ce que par son nom, et des modèles d'intelligence artificielle conçus trop rapidement ou déployés sans précaution présentent des risques certains. Un logiciel de reconnaissance d'images qui identifie mal les personnes à la peau foncée ou un algorithme d'embauche qui ne recommande pas de femmes ni d'hommes expérimentés suscitent la méfiance au point que ces technologies soient comparées à des outils de discrimination massive dans le livre de Cathy O'Neil, « Algorithmes : la bombe à retardement »¹.

L'intelligence artificielle est avant tout une question de données, disponibles de manière massive grâce à internet, et les premiers risques dont nous avons pris conscience sont ceux liés à la vie privée, lesquels ont été pris en compte très tôt par la CNIL (Commission Nationale Informatique et Libertés). La CNIL a joué un rôle moteur dans le développement du RGPD (Règlement Général de Protection des Données, GDPR en

¹ Cathy O'Neil, Algorithmes: la bombe à retardement, Edition Les Arènes, 2018

anglais) qui est en train de devenir un standard international.

Mais la protection de la vie privée n'est pas le seul sujet à regarder, et l'intelligence artificielle ne se développera que si elle est mieux comprise, si le partage des données anonymisées est encouragé et si les situations de fort risque sont prises en compte de manière appropriée. En somme, si on crée les conditions de la confiance.

Malgré de nombreux atouts, l'intelligence artificielle se développe lentement en France

L'intelligence artificielle se développe bien sûr en France, mais beaucoup plus lentement qu'aux États-Unis ou en Chine, où c'est un domaine d'investissement majeur et plus lentement également qu'en Allemagne ou au Royaume-Uni. En 2020, les investissements privés en intelligence artificielle se sont élevés à 20 milliards d'euros aux États-Unis, à 8,4 milliards d'euros en Chine et 1,8 milliard dans l'Union européenne, dont environ 500 millions d'euros en France².

Selon l'enquête European Enterprise Survey menée par Ipsos et publiée en juillet 2020, 42% des entreprises en Europe ont adopté au moins une technologie d'intelligence artificielle - ce chiffre est de 36% pour la France, qui espère rattraper un peu son retard puisque 22% des entreprises ont prévu d'y adopter ces technologies dans les deux prochaines années, contre 18% en moyenne en Europe. Les principaux freins signalés par les entreprises sont notamment la responsabilité pour les dommages potentiels (51% en France versus 33% en Europe), le manque de confiance des citoyens (41% en France pour 28% en Europe) et le manque de standards pour

² Daniel Zhang, Saurabh Mishra, Erik Brynjolfsson, John Etchemendy, Deep Ganguli, Barbara Grosz, Terah Lyons, James Manyika, Juan Carlos Niebles, Michael Sellitto, Yoav Shoham, Jack Clark, and Raymond Perrault, "The AI Index 2021 Annual Report," AI Index Steering Committee, Human-Centered AI Institute, Stanford University, Stanford, CA, March 2021

l'échange des données (39% en France et 33% en Europe)³.

La France ne manque pas d'atouts dans ce domaine, à commencer par l'excellence de ses formations et de sa recherche. L'AI Index Report 2021 de Stanford distingue l'offre de masters en intelligence artificielle en France et nombre de chercheurs de haut niveau publient et sont recrutés par des universités ou des géants de la tech, aux États Unis notamment. En mars 2018, la France a été parmi les premiers pays à se doter d'une stratégie nationale de recherche en intelligence artificielle avec le rapport Villani « Donner un sens à l'intelligence artificielle ».

De nombreuses start-ups sont créées chaque année et certaines se sont déjà bien établies dans ce domaine, comme par exemple Criteo (ciblage publicitaire sur internet à base d'IA, maintenant cotée en bourse à Paris), Dataiku (plateforme transverse AI et data science pour les entreprises, née à Paris et maintenant basée à New York), Shift Technologies (plateforme AI autour de la lutte contre la fraude à l'assurance) ou tinyclues (solution AI sur le marketing data). Des sociétés comme Atos ou Capgemini facilitent la transformation numérique et l'utilisation des données des entreprises.

Malgré cela, l'intelligence artificielle continue à faire peur et les freins en France et en Europe sont forts. Le premier levier de confiance est la formation.

La formation permet de comprendre les risques et comment les prendre en compte

Marie Curie disait que « dans la vie, rien n'est à craindre, tout est à comprendre ». L'intelligence artificielle fait d'autant plus peur parce qu'on ne comprend pas ce que font les algorithmes, qui sont perçus comme des boîtes noires. Les livres et films de science-fiction se sont aussi emparés du

³ [European enterprise survey on the use of technologies based on artificial Intelligence, Luxembourg, Publications office of the European Union, July 2020](#)

sujet avec volupté et dépeignent des sociétés dystopiques. La confiance dans l'intelligence artificielle commence par la compréhension du fait qu'il ne s'agit pas de science-fiction mais plus prosaïquement d'un ensemble de modèles mathématiques qui travaillent sur de grandes quantités de données et produisent des prédictions probabilistes. Apprendre à détecter l'utilisation de ces technologies et à comprendre où se situent les risques devrait être une compétence que chacune et chacun d'entre nous pourrait acquérir, sans avoir besoin de devenir expert en sciences des données. Une société qui comprend les risques et les opportunités offerts par l'intelligence artificielle ouvre la voie à un débat public transparent sur la manière dont nous voulons que ces technologies soient mises en œuvre et recommandent des décisions collectives.

De nombreuses initiatives existent dans ce domaine, à commencer par Objectif IA⁴, une formation en ligne gratuite produite par OpenClassrooms et l'Institut Montaigne en partenariat avec la Fondation Abeona.

Le partage des données

On l'a vu, la France a des programmes de formation de niveau master et plus en intelligence artificielle et un certain dynamisme entrepreneurial. Néanmoins le développement de cas d'usage à valeur ajoutée repose sur la capacité à croiser des jeux de données. Ces données sont parfois accessibles facilement, par exemple des données météorologiques qui sont utiles en agriculture ou en écologie, mais le plus souvent elles ne sont pas publiques et seulement à disposition des entreprises (données clients, fournisseurs ou employés) ou des organisations qui les utilisent (données de santé, données légales). Partager plus amplement ces données permettrait de stimuler l'innovation, mais la démarche prudente de l'Europe

⁴ [Objectif IA](#)

sur la protection des données personnelles, qu'il faut bien sûr saluer, et une certaine aversion au risque, font que nous sommes loin de ce que peuvent faire les États-Unis ou la Chine - c'est une des raisons pour lesquelles les grandes plateformes numériques se sont d'abord développées dans ces pays.

Pour aborder la question de la compétitivité des entreprises européennes dans le domaine de l'intelligence artificielle, les Commissaires Margrethe Vestager et Thierry Breton ont proposé l'an dernier une stratégie européenne pour les données, avec notamment la création d'espaces de données partagées.⁵ Ces espaces permettraient de fluidifier l'accès aux données, en standardisant les formats de ces données pour en faciliter l'accès et en s'assurant que l'anonymisation est faite correctement pour le respect de la vie privée. Dans le domaine de la santé, par exemple, le projet "Brain@Scale" de recherche sur les maladies neurodégénératives de l'Institut du Cerveau a obtenu l'accès à de nombreuses données grâce à la nouvelle base de données partagées des 39 hôpitaux de l'APHP, en suivant des techniques d'anonymisation et d'accès protégé aux données, mais a néanmoins passé beaucoup de temps à « nettoyer » et formater les données pour pouvoir les utiliser. Au-delà du partage entre plusieurs hôpitaux parisiens, on imagine le potentiel correspondant à des données de plusieurs pays, par exemple à l'échelle de l'Europe.

Des tests et des audits pour les cas à haut risque, par des auditeurs indépendants

Les risques liés à l'intelligence artificielle ne sont pas les mêmes s'il s'agit de faire des suggestions d'achats ou bien de prioriser des candidats pour une offre d'emploi et on comprend bien qu'il faille une approche plus prudente dans le deuxième cas. La Commission Européenne propose dans le White Paper on Artificial Intelligence⁶ une approche fondée sur le risque,

⁵ [European Data Strategy](#), Feb 2020

⁶ [White Paper On Artificial Intelligence - A European approach to excellence](#)

selon laquelle une application est considérée à haut risque si le secteur est sensible (par exemple la santé ou les véhicules autonomes) et l'utilisation prévue comporte un risque important (par exemple de blessure). En outre, l'utilisation de la reconnaissance faciale ou d'autres données biométriques est a priori considérée à haut risque. Pour toutes les autres applications, la Commission suggère des labels volontaires.

Une approche basée sur le risque va certainement dans la bonne direction. Dans le rapport de l'Institut Montaigne « Algorithmes : contrôle des biais S.V.P. »⁷ publié en mars 2020, nous suggérons une définition un peu plus nuancée des applications à haut risque. Elles pourraient être classées en trois catégories : le refus d'accès à des services essentiels comme la sécurité sociale, les allocations chômage ou les services bancaires, l'atteinte à la sécurité des personnes et la restriction des droits fondamentaux, c'est à dire le droit à la vie privée, le droit à la protection des données, le droit à la non-discrimination et l'accès à la justice.

Dans ces cas à haut risque, nous pensons qu'il est important que de tierces parties puissent tester et certifier les données et les algorithmes. Les sociétés d'audit financier ont une longue expérience de la certification des comptes des entreprises et pourraient appliquer des méthodes similaires aux audits d'intelligence artificielle, en testant les algorithmes et les bases de données utilisées en amont pour déceler des biais éventuels. Cela serait fait en préservant la confidentialité des données et des programmes de l'entreprise. C'est en quelque sorte analogue à l'approche retenue pour les médicaments qui sont testés avant mise sur le marché pour détecter d'éventuels effets secondaires dangereux.

Dans le domaine des ressources humaines, par exemple, les données peuvent contenir des biais historiques : quand

[and trust, Brussels](#), February 2020

⁷ [Institut Montaigne, Algorithmes : contrôle des biais S.V.P., Mars 2020](#)

Amazon a entraîné un programme d'apprentissage automatique sur des CVs d'employés précédemment recrutés, le système a appris à écarter les candidatures féminines en généralisant le fait que peu avaient été sélectionnées par le passé. Un biais peut également être introduit en sélectionnant un échantillon de données partiel, par exemple quand des programmes de reconnaissance faciale sont entraînés sur des visages de type européen, à la peau plutôt claire.

Le succès du déploiement de l'intelligence artificielle en France et en Europe repose sur la capacité à créer de la confiance : en permettant à chacune et chacun d'entre nous de mieux comprendre ce dont il s'agit, en stimulant le partage de données anonymisées et en testant et auditant les algorithmes à haut risque avant qu'ils ne soient mis en service.

03

Le numérique : levier de l'agriculture durable

Véronique Bellon-Maurel et Isabelle Piot-Lepetit

Le numérique, une nouvelle révolution en agriculture ?

Depuis le Néolithique, qui marque sa naissance, l'agriculture a été le siège d'une série d'innovations dont l'adoption massive a mené à plusieurs « révolutions agricoles ». On appelle « révolution agricole » toute modification importante des systèmes agraires permettant d'augmenter fortement la production agricole (par augmentation de la productivité du travail et/ou des rendements). Jusqu'aux années 2000, on dénombre entre trois et six révolutions agricoles, selon la finesse de l'analyse. Les moments marquants sont (i) l'arrêt de la jachère au 17^{ème} siècle et l'introduction des légumineuses, qui accroissent les rendements, (ii) la mécanisation au milieu du 19^{ème} siècle, qui accroît la productivité et (iii) l'industrialisation (basée sur la motorisation et les intrants chimiques) au milieu du 20^{ème} siècle (Griffon, 2013). Depuis la deuxième décennie du 21^{ème} siècle, une double transition est en marche : agro-écologique et numérique. Promue par les pouvoirs politiques pour offrir une alternative au modèle agricole conventionnel, non durable, l'agroécologie vise une production plus respectueuse de l'environnement, plus résiliente aux aléas climatiques, moins dépendante des intrants et plus rémunératrice. Elle consiste à élaborer des agro-écosystèmes à forte diversité fonctionnelle offrant les services de protection ou de nutrition des plantes, en remplacement des intrants chimiques, via des régulations biologiques et le bouclage de cycles biogéochimiques (de l'azote, du carbone).

La transition numérique en agriculture relève d'une dynamique exogène. Elle utilise les technologies de l'information et de la communication et le calcul pour capter des données, les transmettre, les analyser et produire des indicateurs ou des recommandations. Déjà présentes depuis une quarantaine d'années en agriculture de précision, ces technologies numériques permettent une gestion intra-parcellaire des intrants (« la bonne dose au bon endroit ») en rupture avec la gestion « à la parcelle ». L'agriculture numérique est cependant un concept beaucoup plus large et aussi plus récent (apparu vers 2015). Il embrasse des échelles spatiales et temporelles qui vont au-delà de la gestion de la parcelle (exploitation, territoires, chaînes de valeurs...) et de la saison (gestion à long-terme). L'intégration de cette complexité est rendue possible grâce à trois leviers qui caractérisent l'agriculture numérique - la donnée, le calcul (intelligence artificielle, calcul haute performance...) et la connectivité via les réseaux - la robotique étant souvent vue comme un 4ème levier.

Le numérique accélère la transition agroécologique, jouant le rôle d'une « technologie habilitante » (Bellon-Maurel et Huyghe, 2017). Il ouvre des opportunités dans trois dimensions : l'amélioration de la production, l'inclusion dans les chaînes de valeur et le partage des connaissances, qui seront illustrées ci-après.

Le numérique, une ressource pour améliorer la production

Le numérique permet de créer un agriculteur « augmenté » dans ses capacités de perception (capteurs), de cognition (outils d'aide à la décision ou OAD) et d'action (robotique). Les données étant au cœur de l'agriculture numérique, les systèmes d'acquisition de données sont alors essentiels. Ils vont du capteur fixe installé dans une parcelle et maintenant connecté (via l'internet des objets ou IoT) à des capteurs mobiles - portés par des animaux, transportés par des

opérateurs (ex. smartphone) ou des tracteurs (détection des mauvaises herbes, des déficits nutritionnels...) - et aussi des capteurs aéroportés - sur des drones ou sur satellites. Il y a aujourd'hui de plus en plus d'images d'observation de la Terre, en particulier via les satellites Sentinel 2, qui ont des propriétés très intéressantes en agriculture (nombreuses bandes spectrales, bonne résolution spatiale et temporelle...). Les capteurs connectés fournissent des séries temporelles qui, traitées seules ou en association avec d'autres données, permettent d'estimer des propriétés difficiles à mesurer. L'intelligence artificielle devient indispensable pour traiter ces grandes quantités de données hétérogènes. Par exemple aujourd'hui, on sait détecter des épis de blés sur des images prises au-dessus d'un champ de blé (ce qui remplace avec succès de fastidieux comptages manuels). On sait aussi détecter avec précision le moment favorable pour inséminer une vache grâce à des mesures de température et d'activité. Ces données servent la prise de décision, mais peuvent aussi être valorisées dans les chaînes de valeur, sous la forme d'informations ou dans des systèmes de rémunération des services écosystémiques (par ex. en calculant le carbone stocké).

L'agriculteur est aidé dans sa prise de décision par des OAD. Traditionnellement, ceux-ci font appel à des modèles agronomiques mécanistes qui tiennent peu compte de la situation de chaque exploitation. De nouveaux modes de modélisation, basés sur l'inférence, sont rendus possibles par l'abondance des données collectées sur une ferme. Un défi est alors de construire des modèles adaptés aux conditions locales, intégrant la stratégie de l'agriculteur et dont la logique est comprise par celui-ci. Enfin, l'automatisation (par ex. de l'irrigation) et les robots sont prisés par les agriculteurs, car ces technologies augmentent le confort et la productivité du travail. Elles leur permettent ainsi de consacrer du temps à des tâches plus rémunératrices (transformation, vente...) et l'affranchissent des contraintes

d'horaire. Les robots de traite des vaches, très répandus, conjuguent ces arguments de confort et d'économie. C'est dans le domaine du maraichage « bio » que sont aujourd'hui commercialisés la plupart des petits robots désherbeurs. En plein champ (grandes cultures), les robots doivent répondre à des contraintes plus ardues de navigation autonome et de sécurité et sont encore au stade du développement

Le numérique dans les chaînes de valeur

Au-delà des bénéfices pour la production agricole, le numérique modifie les chaînes de valeur en permettant une désintermédiation/remédiation qui modifie les positions historiques des acteurs de ces chaînes. La désintermédiation, issue de l'intensité informationnelle croissante qui accompagne produits et services, permet d'accéder à des données ou connaissances sans passer par un ou des intermédiaires. La remédiation résulte du fait qu'il devient de plus en plus facile d'agréger produits et services, auparavant achetés séparément.

Les effets attendus des technologies numériques se portent aussi sur la traçabilité et la transparence comme moteur d'une confiance permettant de reconnecter les consommateurs avec les producteurs et de garantir la qualité des produits, via par ex. l'e-certification et la blockchain (chaînes de blocs). Technologie de stockage et de transmission d'informations, transparente, sécurisée, fonctionnant sans organe central de contrôle (système distribué sans autorité centrale), la blockchain permet le suivi des denrées périssables et un diagnostic plus rapide des sources de contamination. Cependant, si la blockchain garantit la validité des données transmises (origine, intégrité, temporalité), elle n'est pas garante de leur véracité. Par ailleurs, tous les partenaires des chaînes de valeur ne sont pas prêts à partager toutes leurs données, même s'ils partagent le souhait de créer plus de transparence et de confiance.

Les plateformes sont aussi au cœur des nouveaux circuits économiques de vente de produits agricoles et alimentaires. De nombreuses collectivités territoriales en proposent pour rapprocher l'offre de la demande, dynamiser l'agriculture et les territoires et approvisionner localement la restauration collective (Loi Egalim). Le verrou qui entrave ces nouveaux circuits est double : visibilité de l'offre et logistique. Aujourd'hui, l'offre est éparpillée sur des plateformes multiples, ce qui limite l'effet réseau (loi de Metcalfe) et donc l'attractivité de la plateforme. Par ailleurs, il est important de tenir compte des pratiques réelles des acteurs impliqués, notamment producteurs et consommateurs, afin d'optimiser l'approvisionnement et le transport des produits.

En agriculture, le numérique modifie les services d'assurance grâce aux systèmes d'observation et aux modèles et permet le développement d'offres « indicielles », indemnisant le client sur la base d'indices liés à ces pertes : indices de rendement régionalisé, indices climatiques, indices basés sur l'imagerie satellitaire ou indices composites combinant des données satellitaires, climatiques, voire d'usage des sols. Toutefois, cela pose des challenges : complexité des indices, non interprétables par les agriculteurs, intégrant difficilement les dynamiques météorologiques dues au changement climatique ou utilisant les données massives - multi-sources, multi-résolutions et non-stationnaires - de manière imparfaite.

Les activités de conseil sont aussi au cœur des systèmes d'innovation en agriculture numérique, afin de mieux équiper les conseillers agricoles en front-office (nouvelles interfaces et applications entre conseillers et agriculteurs) et en back-office (fabrication de nouveaux services via l'utilisation massive de données ou de modèles agronomiques). Mais la digitalisation s'accompagne également de l'émergence de nouveaux acteurs (startup, entreprises des technologies de l'information...) qui transforment l'offre de conseil technique et les dynamiques des systèmes d'innovation agricole (Florez et al. 2021).

Le numérique, un outil pour accroître le capital informationnel et social

Le numérique est perçu par les agriculteurs comme un formidable outil de partage pour se relier au monde et aux autres producteurs¹. Les réseaux sociaux sont prisés par les agriculteurs pour échanger avec leurs pairs, mais aussi pour se relier à la société, comme en témoigne des initiatives telles que FranceAgriTwittos². Les plateformes numériques dédiées facilitent l'accès aux informations avec différents types de supports (vidéos, enregistrements de savoirs paysans, fiches techniques, plans...). Les démarches participatives - pratiquées depuis longtemps pour engager les agriculteurs dans la co-conception de systèmes de cultures et le changement de pratique - s'équiperont demain de dispositifs numériques : simulateurs informatiques grâce auxquels les agriculteurs peuvent accéder à l'impact financier, organisationnel, voire même paysager (via la réalité augmentée) des changements envisagés ou jeux sérieux numériques (négociation, prise de décision collective). Enfin, en facilitant la collecte et l'agrégation des données, le numérique ouvre la voie à « l'expérimentation à la ferme », une forme d'innovation ouverte où agriculteurs et chercheurs collaborent avec des gains partagés : l'agriculteur met en place une nouvelle pratique dont les conséquences sont enregistrées par des capteurs, le chercheur peut réutiliser ces données pour créer des connaissances nouvelles (en les agrégeant à d'autres données). Cependant, la question de la gouvernance des données produites par les agriculteurs reste cruciale.

¹ Digital is Future, AgriAgro - Quel rôle pour le numérique dans le monde agricole ? <https://www.youtube.com/watch?v=NOm7kxTDSMQ>, en ligne le 31 Mars 2021, (intervention à 1:23:20)

² <https://franceagritwittos.com/>

Des politiques publiques pour accompagner la recherche et l'innovation, vers un numérique agricole responsable

L'agriculture numérique suscite aujourd'hui une explosion de startup, de services et produits issus des agrofournisseurs traditionnels (agroéquipements, intrants) mais aussi de l'intérêt de nouveaux entrants comme les GAFAM, en production (Google, Microsoft) et dans la distribution (Amazon). Or le numérique comporte des risques (exclusion du fait de la fracture numérique, renforcement des relations de pouvoir, coût environnemental...). Il devient essentiel de les identifier, de mettre en place des approches de recherche et d'innovation responsables (Owen et al 2012) et de construire les politiques publiques favorisant un développement harmonieux du numérique, au bénéfice de tous les participants des chaînes de valeurs.

References

Bellon-Maurel V., Huyghe C. (2017). Putting agricultural equipment and digital technologies at the cutting edge of agroecology, OCL - Oilseeds and fats, Crops and Lipids, 24(3), D307

Florez M., Bourdon I., Gauche K., Piot-Lepetit I. (2021). Agri-alimentaire 4.0 en France : état des lieux des technologies numériques proposées par les startup, AIM 2021 – 26e Conférence de l'Association Information et Management, 9-11 juin, 16p.

Griffon M. (2013). Vers une septième révolution agricole, C.E.R.A.S | « Revue Projet », 1(332), 11-19.

Owen R., Macnaghten P., Stilgoe J. (2012). Responsible research and innovation: from science in society to science for society, with society. Sci. Public Policy, 39, 751–760.

04 IOT, 5G, IA, Processeurs Quantiques, tout s'accélère...en route vers le futur

François Barrault

Pendant des années les innovations technologiques ont été rythmées et cadrées par les fameuses 'lois de Moore' : à savoir, on double la puissance informatique des processeurs tous les 18 mois. Cette référence, admise par tous les professionnels, a ainsi cranté le développement des systèmes et leur financement tout en permettant de budgéter l'évolution du parc informatique d'ailleurs souvent orchestrée par les géants américains de l'époque au rythme de leurs annonces.

Mais les choses changent et s'accélèrent à une vitesse folle : on parle de facteur 10 000 voire d'un million pour les 8-10 prochaines années. Nous sommes à l'aube d'une révolution industrielle sans précédent qui va bouleverser le monde moderne déjà fortement ébranlé depuis plus d'un an maintenant par la Covid 19. La 5G en est un des piliers, mais pas le seul.

Tout d'abord, la nouvelle la Loi de Moore 2.0 va s'appliquer à l'ensemble de la chaîne de création et de traitement des données : 'sensors', caméras, 'Edge Computing' ou informatique embarquée localement, stockage infini et gratuit et enfin processeurs quantiques. Bien sûr chaque maillon se verra enrichi par de l'IA - Intelligence Augmentée et non Artificielle - qui traitera un nombre croissant d'opérations localement sans avoir à faire appel à des ressources décentralisées : les chips seront de plus en plus miniaturisés avec de grandes capacités de stockage et traitement et, enfin, une très faible consommation énergétique et une connectivité en continu entre eux (IOT, internet des objets) et avec le cloud.

Les objets de la vie courante, nos environnements personnels ou professionnels seront des machines à collecter des données, à les traiter, les comparer et a priori à nous fournir une meilleure qualité de vie, une sécurité renforcée et pourquoi pas une porte d'entrée au 'bonheur numérique' ?

Les nouveaux processeurs quantiques développés notamment grâce au plan 'Quantique' du gouvernement français avec 1,8 milliards d'Euros investis, vont augmenter considérablement les vitesses de calculs dans un rapport jusqu'alors jamais égalé.

La deuxième révolution est portée par les données et leur traitement : 'Data is the new Gold' !. Le premier pilier technologique va créer des trillions de données tous les jours et pour qu'elles soient vivantes et exploitables, il faut les rendre pertinentes, intelligentes, corrélées et surtout prédictives. Cela vaut non seulement pour les comportements des consommateurs mais aussi par exemple pour la maintenance qui se doit de ne plus être seulement curative mais aussi prédictive comme pour les centrales nucléaires ou les robots des marchés financiers.

Enfin, le troisième pilier, le lien essentiel entre la technologie et les données, la 5G dont les enchères de la première allocation de fréquences en 3,5 et 3,71 Ghz ont été attribuées aux 4 opérateurs français. Il était temps car la 5G est déjà opérationnelle dans 60 pays et territoires depuis 2018 ! Quel bonheur d'avoir vu s'allumer le petit icône '5G' sur nos smartphones dernier cri.

Ce triptyque, technologique, données et 5G va transformer notre quotidien et la compétitivité des entreprises et l'IA au cœur de notre vie.

Les exemples sont nombreux ; l'un d'entre eux est particulièrement pertinent pour illustrer cette accélération : la voiture connectée ou bientôt autonome.

Les 'sensors' ou caméras embarquées pourront identifier instantanément les obstacles rencontrés (piétons, voitures, vélos..), iront chercher dans l'ordinateur embarqué (Edge Computing) les données manquantes (tracteurs, side-cars) et, si aucun élément n'est répertorié - un éléphant rose par exemple - chercheront dans le Cloud (grâce à la 5G) et ainsi contextualiseront, analyseront puis renverront à la voiture un ordre validé par tous les spécialistes ou leurs avatars (avocats, assureurs, vétérinaires, dresseur d'éléphant etc..). La voiture s'arrêtera ou contournera l'obstacle en fonction des milliards d'opérations effectuées et ce, en quelques millièmes de seconde.

C'est exactement ce qui se passe avec l'être humain : en 4 itérations notre œil voit un éléphant rose (au lieu de 4000 pour la machine) analyse la situation et prend la bonne décision instantanée (reflexe) ou réfléchie si le temps le permet.

Sommes-nous égaux avec la machine ?... Pas vraiment ! Nous avons 5 sens, la machine 2, la captation visuelle des événements se fait à 300 000 Km/s et auditive à 340 m/s mais une fois dans notre cerveau, la transmission ralentit à.. 100 m/s et nos capteurs transmettent à 60 m/s les informations ou les ordres physiques à nos muscles.

Certes nous avons 3 'sensors' en plus (gout, odorat, toucher) mais dans ce cas de figure notre temps de réaction à l'évènement va de 50 ms à 300 ms (de l'activité neuronale visuelle à la réponse motrice). Ce qui explique le faux départ au 100 m qui est déclaré en dessous d'un temps de réaction de 100 ms. Pendant ce temps-là, l'information dans la voiture et dans le cloud se déplace à des vitesses allant jusqu'à 300 000 km/s. Cette accélération technologique basée sur la vitesse et la puissance, souvent assimilée à tort à l'IA, est en fait un temps de traitement de l'information très accéléré qui vient concurrencer l'être humain dans des tâches d'abord basiques puis très sophistiquées ou critiques au fur et à mesure du déploie-

ment de ces technologies.

Or la 5 G est vitale avec son débit (X5) et son temps de réaction (latence) divisé par 100.

Le déploiement de la 5G sur notre territoire suscite beaucoup de questions et réactions anxiogènes.

On lui reproche des impacts environnementaux, sanitaires et comportementaux. Si on exclut la théorie conspirationniste qui accuse la 5G de diffuser le covid-19, trois thématiques sont au cœur des débats, en plus de celui de la souveraineté nationale et de la cyber-sécurité

- Une exposition aux ondes électromagnétiques (comme avec la 3G ou 4G) plus importantes avec l'utilisation des bandes millimétriques et une multitude d'objets connectés
- Une consommation énergétique importante (objets, capacité de stockage et de transmission)
- L'obsolescence prématurée de milliards de terminaux 4G

Ces annonces perturbent fortement les citoyens et nos élus : il faut faire preuve de beaucoup de prudence et surtout de pédagogie plutôt que de se livrer à des joutes verbales stériles sur les plateaux TV : 'tough with fact, nice with people'

Concernant l'aspect sanitaire et pendant les 3 prochaines années, les fréquences utilisées sont très proches des existantes (3G,4G, Wifi) voire au-delà (Wifi 2,4 Ghz, 5 Ghz) à la maison. Donc pas de panique. Il nous reste 5 ans pour étudier l'impact des très hautes fréquences déjà utilisées dans certains pays.

Sur le terrain très glissant de la consommation énergétique, de nombreux efforts ont été demandés aux constructeurs, équipementiers et opérateurs pour la réduire de manière très significative (facteur 100 à débit égal). L'apport de l'Intelligence Augmentée (IA !) à chaque niveau de la chaîne de

valeur, la miniaturisation des éléments vont contribuer à ces économies vertigineuses. Les constructeurs de mobiles travaillent aussi d'arrache-pied sur l'obsolescence prématurée et programmée des milliards de terminaux 4G et 3G notamment sur leur recyclage ou de leur mise à jour.

En 2020, la Commission Européenne a publié une boîte à outils « cyber sécurité » : son objectif est de définir une approche européenne coordonnée, fondée sur un ensemble commun de mesures qui visent à atténuer les principaux risques en matière de cyber sécurité des réseaux 5G.

La cyber sécurité doit aussi être prévue dès la conception des systèmes, des objets connectés qui coexisteront par milliards et encadrée pour assurer la sécurité des réseaux. La France a répondu aux inquiétudes par une loi (« Loi Huawei ») qui prévoit que toute entreprise qui veut mettre en place un réseau 5G devra obtenir une certification validée par l'ANSSI.

En parallèle de ces 3 révolutions technologiques concomitantes, phénomène unique depuis le début des technologies de l'information, s'accélère le cercle vertueux de l'innovation ou plus exactement du progrès. : la technologie change les usages qui changent les business models et les vecteurs d'investissement.

Le premier confinement a été d'une grande brutalité et vécu par beaucoup comme un traumatisme (on change d'état quasi instantanément). Avec le confinement forcé et grâce aux Zoom, Teams et autres outils collaboratifs, nous avons pu continuer à travailler, produire, échanger, vendre... et comme toujours, l'adaptabilité du genre humain a été remarquable.

Si de nouveaux usages se sont installés très rapidement, de nouvelles questions ont émergé.

Le bureau, sanctuaire physique du travail (« je vais au bureau ! ») a été dématérialisé, les réunions « distancielles »

sont devenues plus courtes, plus percutantes, les décisions plus rapides. Dès lors, dans l'après pandémie, pourquoi aller au bureau, qu'y faire ? Un grand patron du CAC 40 m'a confié que désormais les 6000 employés de leur siège à la Défense qui arrivent dans une tranche de 45 mns, qui suivent les mêmes rituels (pauses cigarette, déjeuners...) et qui augmentent les transhumances pendulaires du matin, soir, week-ends et vacances, tout cela était devenu absurde même si bien sûr demeure l'immense besoin de contacts et de liens physiques.

Tout un pan de l'économie s'est trouvé arrêté - les services divers à l'entreprise (cantines, nettoyages, transports...)- et en même temps, grâce à la technologie, on découvre une nouvelle forme de liberté où le bureau se déplace à la campagne, au domicile ... De nouveaux concepts, comme les '15 minutes cities' émergent pour que les personnes puissent choisir entre leur maison, le 'bureau' et une structure hybride près de chez eux (15 mns à pied ou à vélo) où se conjuguent convivialité et environnement de travail.

Après quelques cafouillages, un nouvel ordre s'est établi. Ce nouvel ordre laissera des traces indélébiles dans nos modes de fonctionnement professionnels et privés.

Une réflexion s'impose donc sur l'organisation des grandes sociétés où le courant mondialiste a entraîné un découpage géographique/taylorien des activités en fonction des seuls critères de coût : production en Chine, centre d'appels en Inde, ingénierie en Europe..

Aujourd'hui s'ajoutent de nouveaux critères de choix, qu'ils soient écoresponsables, souverainistes ou encore cloisonnement et indépendance des sites de production. L'augmentation très significative des coûts des terres rares, chips, acier etc... va d'ailleurs accélérer la refonte du modèle : je produis où je consomme. Et en même temps, le nouvel ordre géopolitique mondial suppose que la communauté européenne se

consolide afin de rester dans la compétition internationale.

Se pose aussi la question de l'organisation du travail : comment mettre en place des nouveaux modes d'organisation apprenantes, des nouveaux modèles de soutien et d'accompagnement managériaux à distance, quel rôle pour le management intermédiaire... ? Ce sujet prend d'autant plus d'acuité qu'il se conjugue avec l'irruption de la data, de l'IA, de la robotisation qui entraîne une substitution des machines à l'homme pour les tâches à faible valeur ajoutée ou encore dangereuses. La compétitivité économique repose sur la capacité des nations ou régions à embarquer les apports des nouvelles technologies pour bâtir une industrie 4.0 plus agile, plus fiable, plus productive. Dès lors la question de l'accompagnement du développement des compétences, de la formation aux métiers de demain est cruciale. L'Allemagne qui veut garder son industrie lourde compétitive et haut de gamme a investi massivement dans les outils 4.0 pour produire moins cher, avec la qualité que l'on connaît tout en accompagnant et formant le personnel de son industrie. Ce pivot où le coût n'est plus le seul critère de choix est une chance pour l'Europe et en particulier la France pour nous permettre de ré-industrialiser intelligemment notre pays.

La fusée à 3 étages est partie et nous allons être les témoins vivants d'une révolution technologique et industrielle sans précédent où j'en suis sûr, l'homme trouvera sa place ... 'Stay tuned ' !!

05

ITER et la fusion de l'hydrogène, un atout économique décisif ?

Bernard Bigot

La compréhension des phénomènes physiques à l'œuvre au cœur du soleil ne date que d'un siècle. Au tournant des années 1920, le Français Jean Perrin et le Britannique Arthur Eddington ont, les premiers, postulé que la formidable quantité d'énergie produite par une étoile de type solaire procédait de la fusion des noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium. Cette intuition, confirmée et mise en équation par le physicien Hans Bethe une dizaine d'années plus tard, a ouvert la voie à une ambition, et à un champ de recherche dont le programme international ITER constitue aujourd'hui une étape essentielle.

Fondé sur les résultats de plus de soixante ans de recherche et nourri du retour d'expérience accumulé par l'exploitation de centaines de machines de fusion, ITER (en latin « le chemin ») ambitionne de démontrer la faisabilité scientifique, technologique, industrielle et économique de la fusion de l'hydrogène sous confinement magnétique à des fins de production nette d'énergie.

Utilisée pour produire de l'électricité de manière massive, en substitution de l'usage intensif des énergies fossiles qui aboutit au risque, aujourd'hui avéré, de graves déséquilibres climatiques, la fusion de l'hydrogène est la seule source d'énergie qui puisse répondre de manière durable, en complément des énergies renouvelables, aux besoins croissants de l'humanité et assurer la « sécurité énergétique » des générations futures. C'est là l'un des plus grands défis auxquels l'humanité tout entière est aujourd'hui confrontée.

Fondée sur un combustible universellement réparti et virtuellement inépuisable compte tenu des faibles quantités requises, la fusion de l'hydrogène est une source d'énergie propre, ne produisant ni gaz à effet de serre, ni déchets radioactifs de haute activité à vie longue (il y aura toutefois production de matière radioactive à vie courte) et dont la mise en œuvre est en outre intrinsèquement sûre.

A partir du milieu des années 1980, sous l'impulsion des États-Unis et de l'Union soviétique, aussitôt rejoints par l'Europe et le Japon, la communauté internationale s'est rassemblée autour d'un grand projet : construire l'installation de recherche qui démontrerait que l'énergie de fusion peut être exploitée à l'échelle industrielle.

Le défi est considérable. Pour le relever, la Chine, l'Union européenne (avec le Royaume Uni et la Suisse), l'Inde, le Japon, la Corée du Sud, la Russie et les États-Unis d'Amérique ont mis en commun leurs moyens industriels, financiers, scientifiques et humains. Ensemble, ces trente-cinq pays représentent plus de la moitié de la population mondiale et environ 85% de la production de richesses de la planète.

En 2005, après s'être accordés sur les caractéristiques et les objectifs de la machine (un « tokamak », acronyme russe de « Chambre toroïdale, bobines magnétiques ») les membres d'ITER ont unanimement décidé de construire l'installation sur le site que proposait l'Europe, à Saint-Paul-lez-Durance (Bouches-du-Rhône) en lisière du centre CEA de Cadarache, à une quarantaine de kilomètres au nord d'Aix-en-Provence. En 2007-2009, la France, conformément aux engagements souscrits en tant que « pays-hôte », réalisait les travaux de nivellement et de viabilisation d'une plateforme de 42 hectares. Dès l'été 2010, l'Europe entreprenait de construire les premiers des quarante bâtiments qui constitueraient le support de l'installation. Dans le même temps, conformément

au principe de « fourniture en nature » (in-kind) qui constitue l'essentiel de leur contribution, les membres d'ITER lançaient la fabrication des pièces de la machine et de ses systèmes auxiliaires.

Le principe de la fusion de l'hydrogène est simple : dans un plasma très chaud, deux noyaux légers (deutérium et tritium, isotopes de l'hydrogène), se recombinent en un noyau plus lourd ; une infime perte de masse résulte de cette conversion, laquelle, conformément au principe de l'équivalence masse-énergie ($E=mc^2$), se traduit par une considérable libération d'énergie. A masse égale, la réaction de fusion est quatre fois plus « énergétique » que la réaction de fission, et plusieurs milliers de fois plus que la plus puissante des réactions chimiques.

Mais si le principe est simple, sa mise en œuvre requiert un ensemble de technologies particulièrement exigeantes, portées aux limites de ce que l'industrie mondiale est capable de réaliser actuellement.

Depuis la conception des bâtiments de l'installation jusqu'à la performance des systèmes de diagnostics de la machine, ITER mobilise « l'état de l'art » d'un très vaste éventail de connaissances et de technologies : protection parasismique, soudage, technologies du vide, cryogénie, magnétisme, chauffage radiofréquence, conversion électrique, neutro-nique, contrôle-commande, métrologie, accélération des faisceaux d'ions, purification des matériaux, séparation des mélanges gazeux...

Schématiquement, la machine ITER est une vaste enceinte sous vide, de forme toroïdale, au sein de laquelle un mélange gazeux composé pour moitié de deutérium et de tritium, deux variétés isotopiques de l'hydrogène qui offrent le meilleur rendement en énergie, est porté à la température,

de l'ordre de 150 millions de degrés C, à laquelle les réactions de fusion peuvent se produire et quasiment s'auto-entretenir. Cette enceinte, d'un volume de 1 400 mètres-cubes, est entourée d'un ensemble d'aimants supraconducteurs dont le champ magnétique extrêmement puissant forme une cage magnétique géante de plus de 20 mètres de diamètre qui chauffe, confine et modèle le plasma.

La fusion d'un noyau de deutérium et d'un noyau de tritium produit un noyau d'hélium et un neutron, tous deux animés d'une très grande énergie (3,5 et 14,1 MeV respectivement, soit jusqu'à vingt fois l'énergie de la collision des noyaux initiaux). Électriquement chargé, le noyau d'hélium demeure prisonnier de la cage magnétique et contribue à entretenir le « feu » du plasma ; électriquement neutre, le neutron s'en échappe, impacte la paroi interne de la chambre à vide et, par transformation de son énergie cinétique en chaleur, en élève la température. C'est cette chaleur qui, dans une centrale de fusion industrielle, amorcera sous forme de vapeur d'eau le cycle classique de production d'électricité.

Un vide très poussé, proche de celui qui règne dans l'espace interstellaire et impossible à obtenir par le seul pompage mécanique, doit être créé au sein de l'enceinte toroïdale. Des techniques de pompage cryogénique ont donc été développées, permettant d'obtenir un vide de l'ordre de $\sim 10^{-6}$ Pa, soit 10^{-11} fois la densité de l'atmosphère.

La cryogénie intervient de manière encore plus massive dans le refroidissement des 10 000 tonnes d'aimants supraconducteurs que compte la machine. Réalisés en composé de niobium-étain (pour les dix-huit bobines verticales créant le champ toroïdal et pour le solénoïde central) ou en alliage de niobium-titane (pour les six bobines annulaires créant le champ poloïdal) les aimants doivent être refroidis à une température proche du zéro absolu (4,7 K ou moins 269 ° C)

pour maintenir leur état supraconducteur.

Cette fonction est assurée par une usine cryogénique qui conditionne et distribue les fluides de refroidissement (dont 25 tonnes d'hélium supercritique à 4,7 K) aux différents « clients » de la machine. D'une puissance de 75 kW à 4.7 K et d'une capacité de liquéfaction de l'ordre de 12 300 litres par heure, cette unité dont les éléments ont été conçus et fabriqués par Air Liquide, est aujourd'hui la plus puissante au monde.

Le tokamak ITER est une machine expérimentale dont le fonctionnement repose sur un ensemble de systèmes de taille industrielle.

Parce que la création d'un plasma requiert pendant quelques fractions de seconde un apport de puissance massif, la fourniture d'électricité est assurée par une infrastructure dimensionnée pour une ville de plus de trois millions d'habitants.

Les équipements de conversion du courant alternatif, fourni par le réseau RTE 400 kV, en courant continu destiné à l'alimentation des aimants occupent deux unités jumelles, d'une surface totale, intérieure et extérieure, de plus de 15 000 m². Outre leur dimension exceptionnelle ces deux unités offrent une illustration éclatante de la manière dont ITER est organisé : l'Europe a construit les bâtiments, la Corée et la Chine ont fourni les transformateurs et les convertisseurs, la Russie les cinq kilomètres de jeux de barres (busbar) qui connectent les convertisseurs aux aimants et l'Inde le système de refroidissement.

L'extrême exigence que manifeste ITER envers ses prestataires industriels est à la mesure des enjeux. Nécessaire et légitime, elle produit des effets fortement stimulants : pour répondre au cahier des charges de la construction d'un bâtiment, de la fa-

brication d'une bobine, d'une pompe à vide ou d'un système de diagnostics, l'industrie doit mobiliser tout son savoir-faire et sa créativité. Cet investissement n'est jamais perdu. Il se réinvestit au contraire dans d'autres fabrications, pour d'autres secteurs d'activité, tels que, entre autres exemples, l'imagerie médicale.

Défi scientifique, défi technologique, défi industriel, ITER est également un formidable défi humain. Au sein de l'organisation internationale ITER (ITER Organization), chef d'orchestre d'un programme dont les activités se déploient sur trois continents, les ressortissants de trente-cinq pays collaborent, dans une langue de travail, l'anglais, qui n'est « maternelle » que pour 15% d'entre eux.

Aucune entreprise, aucun programme de recherche n'a, à ce jour, rassemblé en un même lieu, pour un même objectif une telle diversité humaine et culturelle. Dans ce domaine comme dans tant d'autres, ITER ouvre la voie et son « modèle » préfigure l'avenir des grandes collaborations scientifiques internationales.

ITER enfin n'est pas une entreprise hors-sol. Au terme d'une douzaine d'années d'activité, le programme et son personnel international sont désormais solidement enracinés dans l'environnement économique et social du territoire qui les accueille.

Depuis 2007, date à laquelle les travaux d'aménagement du site de Saint-Paul-lez-Durance/Cadarache ont été lancés, plus de 7 milliards d'euros de contrats ont été conclus avec des entreprises européennes, dont 4,3 milliards (60%) avec des entreprises françaises.

Les mille salariés directs d'ITER Organization apportent chaque année une contribution de l'ordre de 100 millions d'euros à l'économie locale, à laquelle s'ajoutent celle des 200 « ITER Project Associates », des 350 salariés de l'Agence

européenne pour ITER (Fusion for Energy, responsable de la construction des bâtiments) et des quelque 2 800 personnes employées par les entreprises (un demi-millier, françaises à plus de 80%) intervenant sur le chantier.

A la fin de l'année 2025 avec la perspective de production d'un « Premier Plasma », puis, à partir de 2035 en fonctionnant à pleine puissance avec une production de 500 MW de chaleur correspondant à un facteur d'amplification de 10 par rapport à la puissance de chauffage injectée dans le plasma, ITER verra l'aboutissement de l'immense effort engagé pendant plus de trente ans par la communauté internationale.

Déjà, les membres d'ITER ont engagé les études conceptuelles de la « machine d'après », collectivement baptisée DEMO, dont les caractéristiques (fonctionnement continu, connexion au réseau, génération du tritium dans l'enceinte même de la machine, etc.) se rapprochent de celles d'un prototype industriel. A l'horizon 2055-2060, l'énergie de fusion pourrait ainsi contribuer de manière significative à la production d'électricité en France et dans le monde, et donc à la performance économique globale de ceux qui en bénéficieront.

Comme la construction des cathédrales, ITER et la fusion s'inscrivent dans le temps long. Depuis qu'elle fut entreprise, au début des années 1950, la quête de cette nouvelle source d'énergie a mobilisé trois générations de physiciens et d'ingénieurs qui n'ont jamais vacillé dans leur espérance et leur détermination.

De leur ténacité, l'humanité peut s'apprêter dès aujourd'hui à recueillir les fruits. Non seulement en accédant aux avantages de l'énergie de fusion, mais, au-delà, en bénéficiant des progrès que la recherche sur la fusion aura générés dans de multiples domaines technologiques.

06

Énergie, grand projet et technologies

Guy Turquet de Beauregard

L'énergie, un élément essentiel de souveraineté

Pour être souverain et présent géopolitiquement, un pays se doit de produire les biens et services des filières de souveraineté, et en premier lieu, l'énergie. La France a été historiquement un pays très en pointe technologiquement à la fois sur les énergies fossiles et sur l'énergie nucléaire.

Quel est aujourd'hui l'enjeu énergétique de notre pays au XXI^e siècle ? Les fondamentaux restent essentiels, comme le besoin d'indépendance vis-à-vis de l'extérieur ou comme aussi la réduction du déficit commercial français dont les importations d'énergie fossile à 40-45 milliards d'euros représentent les 3/4 de celui-ci.

Energie et Enjeu climatique

Mais aujourd'hui, le développement de l'humanité sur la terre se doit de traiter deux grands problèmes, d'une part la question des ressources naturelles et de leur renouvellement et, d'autre part, le problème des émissions des gaz à effet de serre, en premier lieu le CO₂ dont une caractéristique critique est son accumulation dans l'atmosphère liée à un très lent taux de disparition entraînant le réchauffement climatique.

Par conséquent, il est absolument essentiel, qu'en plus des économies d'énergie, nous utilisions le maximum d'énergie décarbonée au cours du XXI^e siècle. Dès lors, utiliser une part significative d'énergie nucléaire en raison de son potentiel énergétique est devenu incontournable, comme l'a exprimé

dans ses rapports, le célèbre GIEC¹.

Or, quand on examine l'origine de l'énergie sur la terre, on constate qu'elle est issue pour l'essentiel de l'énergie nucléaire. Le soleil n'est qu'un immense réacteur thermonucléaire. C'est elle qui, grâce à la chaleur dégagée par la radioactivité de la terre, est à l'origine du pétrole, du gaz et de la géothermie. En dehors de l'énergie liée à la gravitation de la lune sur les marées des océans, l'origine de notre énergie est donc fondamentalement nucléaire. Ce fait est dû à une loi physique fondamentale, la formule d'Einstein sur l'équivalence masse-énergie ($E=mc^2$)²: toute variation de la masse des noyaux atomiques, comme dans la fission nucléaire, conduit à un dégagement d'énergie considérable sans commune mesure, par exemple, avec celle liée à la combustion des énergies fossiles. La fission nucléaire d'un seul gramme d'Uranium 235 pur est équivalent, en énergie fournie, à plus de 2 000 000 g (2 tonnes) de pétrole brûlé ou 3 tonnes de charbon. Cette loi physique est essentielle pour comprendre l'atout exceptionnel de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité. Cette loi est aussi un atout pour la gestion, en masse et en volume, des déchets nucléaires. Comme elle offre aussi, par la densité énergétique, un avantage géographique grâce à une bien moindre couverture territoriale des moyens de production d'électricité par rapport aux vastes champs éoliens ou photovoltaïques (3 000 éoliennes terrestres sont nécessaires pour produire l'énergie d'un seul réacteur).

L'énergie nucléaire demeure donc l'une des solutions immédiates à ce défi, car elle possède trois avantages critiques. En premier lieu, elle permet d'assurer la fourniture permanente d'électricité tout au long de l'année, la rendant complémentaire des énergies, certes renouvelables, mais intermittentes

¹ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Prix Nobel 2007.

² L'équation est $E=mc^2$ où E est l'énergie emmagasinée dans la matière, m la masse de la matière et c, la vitesse de la lumière. La matière peut être, par ex., le noyau de l'uranium.

que sont les énergies solaires et éoliennes. En second lieu, les réacteurs nucléaires ne produisent pratiquement pas d'émission de gaz à effet de serre. Enfin, les lois de la physique démontrent que l'uranium et le plutonium sont des combustibles très puissants et potentiellement abondants pour plusieurs siècles.

Point important, la politique de décentralisation des moyens de production et de distribution d'électricité (éoliennes et champs photovoltaïques) requiert des investissements importants, plus de 100 milliards € d'ici 2035 d'après la CRE³. On le voit en Allemagne où, si la production d'électricité émet en 2019 près de dix fois plus de CO₂ par kWh qu'en France, les investissements pour les énergies renouvelables sont considérables, conduisant à un prix de l'électricité de 50% à 100% plus cher.

Si les dommages engendrés par les déchets d'énergie fossile sur le réchauffement climatique sont maintenant clairement considérables, ils ont comme caractéristique sournoise d'avoir été longtemps un poison lent et invisible. Les émissions mondiales de CO₂ représentent 35 milliards de tonnes par an actuellement alors que la masse d'uranium nécessaire pour les combustibles des réacteurs, 65 milliers de tonnes, une masse presque un million de fois plus faible. Comment imaginer que les déchets générés par une telle masse de combustibles fossiles ne soient pas vus comme un problème beaucoup plus sérieux à traiter que celui des déchets radioactifs ?

La France a tous les atouts historiques sur la technologie de l'énergie nucléaire

Face au choc pétrolier de 1973 et pour préserver au maximum son indépendance, la France a pris la décision de lancer un grand projet nucléaire dont on peut dire, aujourd'hui, que ce plan est un des plus cohérents. Il est un cas d'école du « Colbertisme high-tech » à la française décrit par Elie Cohen⁴. L'organisation de ce programme a été et reste unique au monde.

En effet, notre pays a choisi de couvrir et de maîtriser l'ensemble du cycle énergétique lié à l'atome en partant de l'extraction d'uranium dans les mines, en passant par l'enrichissement de celui-ci (grâce à la COGEMA aujourd'hui Orano), puis par la conception de combustible nucléaire en lien avec le choix pertinent du réacteur à eau pressurisé PWR (Framatome). De plus, la France, contrairement à beaucoup de pays, a choisi le retraitement des combustibles usés afin d'extraire, à la fois les déchets suivant leur dangerosité et leur durée de vie, mais aussi et surtout, les matières fissiles réutilisables que sont le plutonium créé dans le réacteur et l'uranium restant non fissionné.

Fait rare dans ce métier, Électricité de France (EDF), est à la fois maître d'ouvrage, maître d'œuvre et exploitant unique des centrales nucléaires.

Le Commissariat à l'Énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), assure le leadership en matière de recherche et développement, dans le cycle du combustible et les futurs réacteurs.

Et enfin, un élément critique pour asseoir la crédibilité démocratique de cette énergie a été la décision en 2006 de mettre en place une autorité de sûreté indépendante et puissante,

⁴ Le Colbertisme « high tech », Elie Cohen, éd. Pluriel enquête

l'ASN. Le succès de ce grand projet depuis plus de 30 ans est incontestable.

Les conditions du maintien de la France dans l'énergie nucléaire

Les besoins d'électricité devraient croître de 40 à 45% de 2020 à 2050 en raison du plan climat et du besoin des solutions de stockage d'énergie comme l'hydrogène. Une part d'énergie nucléaire dans le mix énergétique est d'autant plus indispensable.

Or, la France a tous les atouts pour rester présente dans la course technologique de l'énergie avec le nucléaire.

Mais cela suppose plusieurs conditions :

- La France doit décider de conserver une politique nucléaire de taille critique (de 30 à 50% pour sa production d'électricité à l'horizon 2050), elle doit le faire savoir et partager celle-ci sans complexe sur le long terme. Ce faisant, elle rendra alors crédible une filière d'avenir pour les meilleurs techniciens et ingénieurs, et sera à même de conserver le savoir-faire pointu, essentiel à cette discipline. Le succès des deux réacteurs EPR en Chine est en particulier lié à une vision long terme, donc mobilisatrice des Chinois.
- Elle doit convaincre la Commission européenne de la pertinence du projet Hercule d'EDF au regard de la nécessité d'investissements à très long terme qui, eux, ne peuvent suivre les règles du marché de court terme.
- Elle doit conserver sa capacité de R&D avec le CEA, véritable DARPA⁵ à la française, et les équipes du groupe EDF. En cohérence avec sa politique de retraitement des combustibles, le CEA doit continuer ses recherches sur les réacteurs de 4e génération en particulier, le projet Astrid, réacteur à neutrons rapides. Le projet Astrid, décidé en 2001 avec les

⁵ DARPA, agence américaine pour la recherche stratégique

pays majeurs du programme international Génération IV pour les réacteurs du futur, présente trois grands objectifs pour la fourniture d'électricité d'origine nucléaire : la poursuite à long terme de cette énergie, l'amélioration de la sûreté après Fukushima et le traitement approfondi des déchets par transmutation. L'équipe France doit aussi participer au programme de R&D sur les petits réacteurs modulaires dit SMR. L'enjeu est de créer un produit simple et sûr, construit en modules en usine, et pouvant être exporté vers différents pays.

- On doit continuer le retraitement des combustibles qui permet de récupérer le plutonium, ce combustible nucléaire puissant permet d'envisager une source d'électricité pour plusieurs centaines d'années avec les réacteurs de 4e génération.

- La France doit finaliser la construction d'un maillon essentiel pour l'avenir du nucléaire, le réacteur de recherche RJH à Cadarache, qui permet d'étudier la performance des combustibles nucléaires et la tenue des matériaux aux rayonnements dans les réacteurs actuels et futurs. C'est le seul réacteur de recherche en construction en Europe. Il fournira en plus les radioéléments nécessaires aux 30 millions d'examens annuels en médecine nucléaire.

- S'agissant des déchets radioactifs, la France, par son autorité de sûreté indépendante, l'ASN, a élaboré un Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs dans le cadre d'un groupe de travail pluraliste. Ce Plan, organisé de manière publique plus que pour toute autre activité industrielle, doit avoir les moyens d'une gestion rigoureuse de ces déchets.

Un atout français a paradoxalement disparu. Les corps techniques de l'administration (Mines, Ponts, Armement, Télécom, etc.) ont joué un rôle essentiel en France dans la construction économique du XXe siècle, car ils étaient à la fois entrepreneurs et régulateurs. Les Pierre Guillaumat, Georges Besse ou André Giraud étaient de cette culture. Sur ces sujets, ils

savaient donc en pratique, de quoi ils parlaient pour décider et agir. Aujourd'hui, l'obsession des pouvoirs publics est d'interdire les mouvements entre acteurs et contrôleurs. En conséquence, les meilleurs éléments qui sont peu attirés par le seul rôle de régulateur, quittent leur corps privant les pouvoirs publics de compétences essentielles. Le résultat est que ceux qui régulent et qui contrôlent n'ont plus la connaissance du terrain, sans compter le fait qu'ils ne peuvent se valoriser qu'en multipliant les réglementations.

L'écosystème nucléaire est une source importante d'industries non-nucléaires

Phénomène beaucoup moins connu, l'écosystème nucléaire français a généré une série de savoir-faire et donc d'entreprises industrielles, sur des marchés bien loin de l'énergie nucléaire. C'est la vertu des retombées des grands projets « colbertistes ».

Les besoins du programme nucléaire ont nécessité le développement de hautes technologies et d'outils génériques extrêmement puissants dont on bénéficie encore aujourd'hui. Outre la science des matériaux, la médecine nucléaire, la métallurgie, la chimie et la physique issues de la filière nucléaire, deux domaines inattendus doivent être mentionnés pour la place prise dans l'économie française. Originellement affecté à la recherche nucléaire, le site CEA de Grenoble est aujourd'hui totalement « dénucléarisé » au profit des nouvelles technologies et de leurs applications. En particulier, si la France a gardé un minimum d'industrie des semi-conducteurs et des composants électroniques avec des entreprises comme STMicroelectronics ou Soitec, c'est grâce au dynamisme des équipes de pointe du CEA de Grenoble qui reste un des laboratoires les plus performants au monde. On est loin du nucléaire à l'origine de la création de ce centre.

Le deuxième domaine impressionnant concerne le calcul scientifique et les gros calculateurs si largement développés pour les réacteurs et l'armement nucléaires. Ils sont devenus essentiels aujourd'hui pour la R&D dans de nombreux domaines industriels comme celui de l'aéronautique, l'automobile ou les nouveaux médicaments. C'est un facteur clé dans le raccourcissement des délais de développement des produits complexes. Il suffit en France d'observer le succès de l'entreprise Dassault Systèmes.

Arrêter un grand projet comme le programme nucléaire français aurait donc, en plus, des effets collatéraux qu'il faut soigneusement éviter.

07

L'avenir des biotechs françaises passe-t-il par un Nasdaq européen ?

Denis Lucquin

La course aux vaccins anti-Covid a mis en lumière les biotechs. Le grand public a découvert ce curieux type d'entreprise qui semble parfois pouvoir damer le pion aux champions mondiaux de la pharmacie. La France a-t-elle ses chances dans cette compétition technologique d'un nouveau genre ? Les évènements récents nous apportent des enseignements utiles.

Les leaders de demain ne seront peut-être pas les sociétés qui ont démarré la course en pole position. Il semble important d'abord de tordre le cou à une idée répandue : le double échec de Sanofi et de l'Institut Pasteur pour développer rapidement un vaccin contre la Covid-19 serait le signe d'une déliquescence de l'innovation française. S'arrêter à un tel constat c'est ignorer les spécificités du processus d'innovation en pharmacie et en particulier le taux d'attrition propre au domaine : moins de 10% des projets ayant réussi des essais cliniques de Phase I font l'objet d'un lancement commercial. En janvier 2021, l'OMS recensait 236 vaccins anti-Covid en développement dont seulement 64 en phase clinique ; seule une infime minorité atteindra le marché.

C'est ensuite oublier la réalité du contexte sanitaire : il faudra probablement vacciner les populations de façon répétée. De nouvelles contraintes entreront alors en jeu : le coût de production et la logistique de distribution. Le prix des vaccins achetés par la Commission européenne s'étale de 1,78€ à 15,5€ l'unité, soit quasiment un facteur 10. Ce facteur deviendra discriminant lorsqu'il s'agira de vacciner des milliards de personnes tous les ans. L'obligation de maintenir une chaîne

du froid en sera un autre. Il semble donc trop tôt pour se faire une idée des sociétés qui deviendront les leaders de la vaccination anti-Covid.

Les biotechs : les nouveaux acteurs de l'innovation santé

Les deux premières sociétés à avoir mis au point un vaccin contre la Covid-19 sont des biotechs. L'une américaine, Moderna, l'autre allemande, BioNTech. La pandémie a donné un coup de projecteur incroyable sur ce type d'entreprise qui a émergé il y a à peine 40 ans.

Une biotech, qu'est-ce que c'est ? C'est une entreprise le plus souvent créée par des scientifiques pour développer une innovation qui répond à un problème de santé jusque-là insatisfait. Exclusivement centrée sur la R&D, elle doit son financement dans un premier temps aux fonds de capital-risque et dans un second temps, après leur introduction en bourse (IPO), à des fonds intervenant sur les marchés boursiers. Au moment de leur IPO, la plupart des biotechs ne sont ni profitables, ni même ne génèrent un chiffre d'affaires significatif. En 2018, il existait 30 sociétés cotées sur le Nasdaq dont la capitalisation dépassait le milliard de dollars mais qui ne disposaient pourtant pas de produit commercial¹. Les groupes pharmaceutiques sont une autre source importante de financement. A l'affût des innovations nées dans les biotechs, ils nouent des partenariats pour prendre le relai dans les dernières phases, particulièrement dispendieuses, du développement de médicaments. Aujourd'hui, l'innovation santé est clairement portée par les biotechs. En 2018, 64%² des médicaments faisant l'objet d'une demande d'autorisation de mise sur le marché auprès de la FDA américaine étaient issus de travaux de R&D initiés dans une biotech, contre seulement 50% en 2010. Cette progression atteste de l'ampleur du phénomène.

¹ Rapport E&Y, Beyond Borders 2017

² FDA and IQVIA Institute, Avril 2019

Face à une complexité scientifique croissante, la force des biotechs réside dans leur agilité et leur business model symbiotique

Les développeurs de nouveaux médicaments font face à une complexité scientifique inédite. Les travaux CRISPER CAS 9 en sont l'exemple parfait. Ces travaux - qui sont à la génétique ce que la fonction « Ctrl F » est au traitement de texte - ont été publiés pour la première fois en 2012. Huit ans après, leurs auteures, l'Américaine Jennifer Doudna et la Française Emmanuelle Charpentier, reçoivent le prix Nobel de chimie et, en à peine dix ans, plusieurs dizaines de biotechs utilisent cette technologie pour développer de nouveaux outils thérapeutiques. Jamais dans l'histoire de la biologie a-t-on vu une évolution aussi rapide entre les premières publications et leur application industrielle. Cet exemple n'est qu'un parmi d'autres : l'avènement de la thérapie génique, de la thérapie cellulaire ou de l'immunothérapie sont autant d'innovations qui donnent naissance à de nombreuses biotechs. L'intelligence artificielle s'annonce comme la prochaine étape dans cette révolution permanente.

Le monde des biotechs est en perpétuelle effervescence. Ces sociétés ont une capacité exceptionnelle à se réinventer. Il en va parfois de leur survie lorsqu'elles se retrouvent dans une impasse technologique. Mais elles sont aussi capables de se transformer devant une opportunité. Les cas de Moderna et de BioNTech sont à ce titre édifiants : ces entreprises ont été créées pour développer de nouvelles voies de lutte contre les cancers, sur la base d'une théorie consistant à utiliser des fragments d'ARN messenger pour réorienter le système immunitaire vers les cellules cancéreuses. La communauté scientifique s'accordait depuis des années à prédire un avenir certain à cette technologie en oncologie. Il aura suffi de quelques semaines au management de ces deux entreprises pour réorienter leur développement vers les vaccins contre

le SARS-CoV-2 dont le génome venait d'être publié. A l'occasion de son IPO fin 2018, Moderna avait levé 600 M\$ sur la promesse de la technologie des ARN messagers appliquée aux traitements individualisés en oncologie. Une collaboration stratégique avec AstraZeneca était alors scellée en oncologie et contre certaines maladies cardiométaboliques. Un an avant qu'ils ne deviennent le point focal du succès de cette entreprise, les vaccins antiviraux étaient encore à l'arrière-plan. En octobre 2019, BioNTech suit les traces de Moderna et lève 150 M\$ sur le Nasdaq. Elle aussi va connaître une évolution fulgurante similaire.

On assiste à ce que certains ont appelé un développement symbiotique entre deux catégories d'entreprises. D'un côté, les biotechs agiles, à la pointe de l'innovation et en perpétuelle effervescence. On en compte près de 4 000 dans le monde. De l'autre côté, les groupes pharmaceutiques, handicapés par leur taille, qui chassent au moyen d'accords de co-développement, de licences et d'acquisitions, les innovations pour alimenter leur « pipeline ». Certains peuvent consacrer jusqu'à 50% de leurs dépenses en R&D à cette activité de sous-traitance : l'open innovation avant la lettre. Les biotechs se consacrent aux phases amont du développement, tandis que les groupes pharmaceutiques se spécialisent dans les phases aval (Phases cliniques III et IV) qui demandent des moyens et des compétences souvent hors de portée des biotechs. Dans cette coexistence symbiotique entre biotechs et groupes pharmaceutiques, les biotechs américaines et européennes ne jouent pas à armes égales. La différence ? L'accès aux États-Unis à un marché boursier dont la profondeur n'a aucun équivalent en Europe.

La domination de la bourse américaine bientôt contestée par Shanghai et Hong Kong ?

Avec Moderna, on voit la puissance du système financier

américain à l'œuvre. Après avoir levé 1,4 Md\$ auprès de fonds privés, puis 600 M\$ lors de son IPO en 2018, l'entreprise lève à l'occasion d'un nouveau tour de financement boursier plus de 1 Md\$ début 2020, qui s'accompagne de près de 500 M\$ de subventions de l'Etat américain pour développer son vaccin anti-Covid. Grâce à ce système, les meilleures biotechs sont devenues de véritables sociétés pharmaceutiques internationales. Pour n'en citer que quelques-unes : Amgen née en 1981 (23 Mds\$ de CA en 2019), Cellgene née en 1986 (530 M\$ de CA en 2019), Gilead née en 1987 (22 Mds\$ de CA en 2019). Moderna sans conteste suit un chemin similaire. En Europe, il existe bien quelques biotechs disséminées dont la capitalisation boursière dépasse le milliard de dollars : les danoises GenMab et Ascendis, les belges Galapagos et Argenx, les allemandes BioNtech et Curevac. En France, Valneva a intégré ce club fermé des licornes. Malheureusement, on constate que pour en arriver là, toutes - à l'exception de Valneva tirée par ses développements sur le vaccin contre la Covid-19 -, ont dû passer par une cotation sur le Nasdaq.

Le risque de voir émerger un axe sino-américain est probable. Depuis 2018, la bourse de Hong Kong a revu ses règles de cotation. Désormais, les biotechs n'ayant ni revenu ni profit y sont autorisées. Cela a favorisé l'arrivée massive de capitaux et les IPOs, avec 17 biotechs de Chine continentale cotées en moins de 3 ans pour un montant total de 5,12 Mds\$. En 2019, le montant moyen des fonds levés était 4 à 5 fois supérieur à la moyenne américaine, la plus importante levée de fonds par la cotation ayant même dépassé 900 M\$. En comptant les biotechs de la bourse de Shanghai, la Chine disposait fin 2020 de 26 sociétés cotées, dont 18 avec une valorisation supérieure à 1 Md\$. En 2020, 65 IPOs de biotechs ont été effectuées aux Etats-Unis, 34 en Asie et seulement 13 en Europe.

Pour un Nasdaq européen coopératif

La maîtrise des technologies des sciences du vivant - les biotechnologies - déterminera en grande partie l'avenir des industries de la santé. Le risque est grand de voir se consolider un axe sino-américain favorisé par la maîtrise des outils de financement de ces industries. Si l'Europe a connu plusieurs initiatives...elles ont toutes échoué. La principale fut la création en 1991 de l'EASDAQ, sorte de « copié-collé » du Nasdaq. Ce projet n'a pas survécu à la compétition entre les bourses nationales : Euronext a créé le Nouveau Marché en 1996 (futur Alternext puis Euronext Growth), la Deutsche Börse a lancé le Neuer Markt, la Borsa Italiana le Nuovo Mercato. Et avant même, le London Stock Exchange avait créé l'AIM. Le Nasdaq a aussi tenté sa chance en Europe et s'est rapidement retiré pour se concentrer sur les pays scandinaves en devenant le Nasdaq OMX. Résultat, aucun de ces marchés n'a atteint la taille critique qui lui permette de se comparer au Nasdaq américain. Il semble vain aujourd'hui de réitérer une initiative de ce type.

Que faire alors pour que la France reste dans la course technologique ? La réponse doit être européenne. La France dispose d'entrepreneurs de qualité en nombre et la science fondamentale développée dans ses laboratoires est excellente. Il lui manque, comme à tous les pays européens, un outil de financement par la bourse à la hauteur de ses ambitions. Il serait judicieux d'inciter les bourses nationales ou transnationales (Euronext opère dans quatre pays) à coopérer d'avantage, par exemple en s'associant sur le segment de marché des sociétés innovantes dont les biotechs font partie. Individuellement, ces marchés n'affichent généralement pas une rentabilité importante mais ensemble ils présentent un potentiel réel.

Comment
développer de
grands projets
technologiques
aujourd'hui ?

Le renouveau technologique passe par des Pôles de compétitivité

Jean-Hervé Lorenzi

Au tout début il y a Alfred Marshall et son célèbre concept de district industriel. C'est dans le chapitre X de ses Principes d'économie politique qu'il analyse le phénomène de « localisation de l'industrie », c'est-à-dire la concentration d'un grand nombre de petites entreprises dans certaines localités¹. Comme le rappelle Jean Claude Dumas « La structure économique qu'il décrit présente un ensemble de traits étroitement articulés : l'agglomération de l'industrie sur un territoire géographiquement délimité, la spécialisation de l'industrie dans une seule production, le rassemblement d'un grand nombre d'entreprises de petite taille spécialisées dans une phase (ou un petit nombre de phases) de la fabrication du produit, le développement d'activités industrielles et commerciales auxiliaires, une atmosphère industrielle favorable à l'apprentissage et à l'innovation, et un réservoir de main d'œuvre qualifiée et mobile² ».

Ce concept initial allait profondément s'enrichir avec une nouvelle étape et l'idée de « cluster d'innovations. » Elle s'appuie sur 3 éléments complémentaires, l'échelle régionale, la gouvernance associant recherche, industrie et universités et un objectif de développement fondé sur des innovations. En fait, cette avancée repose sur un nouveau développement de la géographie économique qui s'intéresse aujourd'hui principalement à deux approches. La première, dans le prolongement de la vision marshalienne consiste à considérer l'émergence de zones géographiques caractérisées par une agglomération d'entreprises. La seconde est une analyse plus macroéconomique qui explique la raison pour laquelle les

¹ Marshall (1890) Principes d'économie politique

² Jean Claude Dumas (2007) « Districts industriels : du concept à l'histoire » in Revue économique vol 58 n° 1, p 131-152

firμες d'un même pays ou d'une même région auront toujours une tendance supérieure à échanger entre elles.

Il s'agit de fait d'une véritable révolution culturelle, comme le montrent Piore et Sabel³ qui fondent une nouvelle approche de politique industrielle et d'innovations technologiques. La logique est imparable, les districts industriels se caractérisent par la présence d'une multitude de PME spécialisées dans la production d'une variété limitée de produits et de processus, mais étant donné leur accès aux spécialités des autres membres du district, ces interrelations les rendent collectivement disponibles aux évolutions. En fait, la coopération, l'apprentissage collectif, les transferts technologiques et l'émergence de nouvelles affaires exigent une proximité géographique élevée. Dans un travail sur le Japon, Takeushi⁴ avait chiffré la distance optimale à 15 min. Le gain de temps, grâce à la proximité spatiale, est un gain informel et conditionne l'échange mutuel effectif.

L'approche des clusters est évidemment liée à celle des districts industriels. Mais un pas nouveau est franchi, puisque le sous-système industriel se développe en fonction d'un ensemble d'éléments complémentaires, formation commune, système de financement spécifique.

« Industrial cluster » ou grappes industrielles, est donc une approche directement issue de l'économie d'agglomération. « Un ensemble cohérent dans lequel le système de production territoriale, la culture, la technologie, les firmes et les institutions sont en étroite relation. Dans ce milieu la confiance et la réciprocité sont deux concepts fondamentaux. Le système est fondé alors sur un ensemble de règles implicites et de normes culturelles et sur les institutions qui supportent l'innovation et

³ Piore et Sabel (1984) *The second Industrial divide : possibilities for prosperity*, New York, Basic Books

⁴ Takeushi (1992) « Activities of Small Scale Industries in Japan, through inter enterprise cooperation » in Report of research, Nippon Institute of technology N°21

qui en assure la flexibilité ⁵».

Mais c'est Nelson⁶ qui va donner à la théorie des clusters sa véritable dimension qui va nourrir l'idée des Pôles de compétitivité. Son approche développe l'idée des politiques industrielles destinées à des sous-systèmes productifs caractérisés par leurs spécificités. C'est cette constatation qui est le fondement de la vision des « clusters » de Nelson et qui met l'organisation technico-industrielle au cœur du succès.

Une politique industrielle et de développement technologique efficace est alors une politique active qui s'appuie sur un réseau de clusters visant à promouvoir les infrastructures spécifiques à chacun d'entre eux.

En France cela s'est traduit par une innovation institutionnelle, la création des Pôles de compétitivité qui avait pour objectif de réunir les principaux acteurs locaux de recherche et d'industrie. Contrairement à ce qu'on avait pensé à l'époque, le nombre important de Pôles n'a pas nui, bien au contraire, à l'intérêt de la démarche car elle a surtout maintenu une grande diversité des activités industrielles en France. Bien entendu tout cela n'a pas suffi à arrêter la désindustrialisation, ce fut un faible rempart, mais un rempart quand même.

L'audit de cette politique a été réalisé à plusieurs reprises afin de savoir si les Pôles censés réunir les entreprises et les acteurs de la recherche et développement avaient permis d'obtenir de bons résultats dans le développement technologique. C'est ainsi que France stratégie en 2019 a procédé à une évaluation, limitée dans le temps, 2005-2015 sur l'efficacité des Pôles de compétitivité par rapport aux critères d'incitation des entreprises à investir d'avantage en R&D. Les résultats obtenus sont clairs « 1 euro de subvention publique reçu

5 Camagni (1995) « the concept of innovative Milieu and its relevance for public policies in European Lagging Regions », Papers in Regional Science n°74

6 Nelson (1999) The sources of industrial leadership, The economist n° 147

dans le cadre de cette politique aurait généré en moyenne 2,5 euros supplémentaires de dépenses en R&D par les PME bénéficiaires. » Dans le cadre du même audit on montre que la structuration des réseaux d'innovations ne s'est pas améliorée de manière systématique. On retombe bien sur le caractère très positif de ces Pôles, avec un potentiel de développement important qu'il faut maintenant mettre en œuvre.

Tout ceci souligne à la fois le fait que si l'on veut relancer l'industrie, la recherche et développer des grands projets technologiques au niveau français et européens ces Pôles sont des acteurs importants. Mais leur structure est encore très fragile. Ils n'ont pas de capacité de lever des fonds ou développer des politiques propres de R&D. Certes, ils sont un 1^{er} élément entre les acteurs industriels mais les grandes institutions de recherche publique et d'enseignement supérieur sont très peu représentées. Si l'on veut donc impulser mettre en œuvre des ambitions technologiques s'appuyant sur la recherche en amont et sur les innovations industrielles en aval, ce réseau est essentiel mais pas encore suffisamment outillé pour assurer le succès de grands projets technologiques.

L'avenir de la France comme grande nation scientifique

Alain Trannoy

Brosser à grands traits quelques lignes de force et de faiblesse de la France comme nation scientifique, en support d'une nation technologique, en esquisant quelques idées pour consolider les acquis et combattre les forces qui nous entraînent vers le bas, tel est le but de cette modeste contribution.

Depuis la révolution française, le pays a pactisé avec la science. Le rôle des grands scientifiques dans l'élan révolutionnaire qui a abouti à la création de grandes écoles scientifiques et technologiques a contribué à l'ADN de la nation française, tout comme l'idée d'égalité et la déclaration des droits de l'homme et du citoyen. La mémoire des grands et de petits savants aujourd'hui oubliés du XIX^{ème} siècle a été honorée par des statues, des noms de rues, de squares et de lycées. Si c'est encore le cas pour de grands savants comme Pierre Gilles de Gennes du siècle suivant, les signes de reconnaissance et d'estime de la part de la nation se font plus rares. Il semble difficile de nier que la société française semble prendre une distance avec les scientifiques et la science en général. Ce constat est peut-être valide pour toutes les nations occidentales, mais il semble plus prononcé dans le cas français.

Les résultats d'un sondage réalisé par l'IFOP en 2018 auprès des Allemands, des Britanniques, des Américains et des Français peut fournir l'indice d'un malaise. La proportion de Français s'estimant avoir une culture scientifique n'est que la moitié de celle des Allemands (27% contre 54%), les Anglais et les Américains se trouvant à mi-chemin (autour de 45%).

Des stratégies scolaires qui ne portent pas à l'autosatisfaction pourraient expliquer un autodénigrement. Toutefois, la réponse à une seconde question interroge quand on la rapproche des réponses à la première. Admettons que le déficit de connaissances scientifiques soit effectivement plus affirmé dans notre pays. On pourrait s'attendre à ce que les Français soient au moins autant désireux que les autres nationalités à ce que les jeunes possèdent une culture scientifique. Or l'enquête pointe le résultat contraire. Il s'avère en effet que 14% des Français pensent qu'il ne faut pas sensibiliser davantage les jeunes tout au long de leur parcours scolaire et étudiant à l'importance des questions scientifiques. 14% c'est évidemment peu, mais c'est tout simplement le double de la proportion des Américains et des Britanniques. En maniant le raccourci et un brin de provocation, une frange de la population française se proclame ignorante en matière scientifique et fière de l'être ! Il faudrait creuser pour comprendre d'où vient cette réticence, cet éloignement, qui doit être relativement récent et ne provient pas en tout cas de notre héritage révolutionnaire. Sans revirement de cette attitude, il semble illusoire de penser que la culture scientifique va progresser dans notre pays dans les prochaines années. Loin d'être anecdotique, de telles attitudes peuvent alimenter une tiédeur à financer la science. L'adhésion à un tel soutien ne peut venir que d'un assentiment généralisé.

C'est à l'école que naissent les futures vocations de savant et d'inventeur, c'est à l'université et dans les écoles d'ingénieur qu'elles se renforcent et que les compétences se forgent. La relation avec les mentors est essentielle. C'est dans les labos, en licence, en master, et évidemment en doctorat, que les intuitions, les nouvelles idées porteuses germent. Les entreprises ne récoltent que les fruits en bout de course. Sans grands savants, pas d'excellents étudiants qui ensuite sèmeront les graines des nouvelles technologies dans les laboratoires des entreprises. Sans pôles universitaires qui brillent, il est illusoire

de vouloir arroser les entreprises à travers le crédit impôt-recherche. Cela revient à arroser le sable ou, dans le cas de la France, soyons juste, la garrigue.

Un effort global doit être engagé à tous les échelons de la chaîne qui produira les scientifiques et les inventeurs de demain. A cet égard, les derniers résultats de l'enquête TIMSS (Trends in International Mathematics and Science Study), pour l'année 2019, pour les classes de CM2 et de 4^{ième} sont tout simplement alarmants, voire indignes de l'histoire scientifique de la France. En sciences, le score français est de 488 contre une moyenne de l'UE à 522 en classe de CM2. Ces chiffres placent désormais la France en avant-dernière position, juste devant le Chili sur la trentaine de pays de l'OCDE enquêtés. Les résultats en classe de 4^{ième} sont à peine meilleurs. Les déséquilibres de nos formations éducatives sont nombreux, profonds, et nécessitent une réponse globale et coordonnée.

Contentons-nous de proposer une mesure en apparence modeste. La Fête de la Science est une excellente initiative ; une idée serait de la prolonger par des épreuves ludiques, des sortes de compétitions entre écoles, collèges et lycées, pour créer de nouveaux outils réels ou virtuels, pour encourager l'esprit de découverte, l'éveil à la curiosité scientifique, un peu dans le goût des olympiades de mathématiques, mais dans le souci, cette fois, de développer l'intuition et le raisonnement inductif.

Si l'on quitte notre élève de 4^{ième} pour regarder les performances de ses aînés dans les labos universitaires, les résultats en recherche scientifique à visée technologique sont heureusement bien meilleurs en comparaison internationale. L'Observatoire des Sciences et des Techniques (OST), placé auprès du HCRES, y procède régulièrement dans tous les champs scientifiques. Nous privilégions les résultats concer-

nant quatre domaines proches des applications en recherche & développement : la biologie appliquée et l'écologie, l'informatique, la chimie, et les sciences pour l'ingénieur. La France est spécialisée en informatique, mais sous-spécialisée dans les trois autres disciplines par rapport à son poids moyen¹. L'Allemagne n'a pas, à cet égard, un profil très différent de la France mais apparaît en retrait relatif en informatique. Si l'on élargit le champ, pour scruter un pays comme la Corée, de même taille grosso modo que la France, le choix est tout autre, avec un surinvestissement dans deux disciplines du développement technologique, la chimie et les sciences pour l'ingénieur. S'agissant maintenant du volume de publications, si l'on raisonne au niveau de toutes les sciences en moyenne, la France publie environ 30% de moins que l'Allemagne et ses publications sont un peu moins citées. Pourtant dans les disciplines technologiques, l'impact des publications de la France est supérieur en biologie appliquée-écologie, en sciences pour l'ingénieur et en informatique et n'est vraiment inférieur à l'Allemagne qu'en chimie qui reste un domaine d'excellence de ce pays. Pour résumer, au niveau européen, avantage France en informatique qui a encore une carte à jouer, avantage Allemagne en chimie.

La comparaison internationale au niveau de la R&D privée fait entrevoir des résultats mitigés. Par exemple, dans le classement réalisé par Clarivate Analytics, la France apparaissait au 3^{ème} rang mondial depuis 2011 et alignait, encore en 2016, dix sociétés dans le Top 100 des entreprises les plus innovantes. En 2020, elle n'en compte plus que cinq institutions dont une institution publique le CEA. Il s'agit peut-être d'un incident de parcours, mais l'Allemagne est restée stable à la quatrième place avec 4 entreprises. La France est le second dépositaire de demandes de brevets en Europe avec une performance en ligne avec le poids relatif de son industrie par rapport à l'industrie allemande (40%). Le fait

¹ Cf Graphique 17 du rapport de l'OST «La position scientifique de la France dans le monde 2000-2015) » p.47.

de déposer autant de brevets que l'Angleterre et l'Italie réunies est une maigre consolation. Encore faut-il noter que la performance française est obtenue en comptant les instituts de recherche publics que sont le CEA, l'INSERM, le CNRS, l'IFP et l'Institut Pasteur qui sont responsable au total de 10% des brevets français. Dans les autres pays, ce sont les universités qui sont à l'honneur, Oxford et Cambridge, Leuven et Gent en Belgique, Zurich et Lausanne en Suisse. Point positif, la tendance n'est pas défavorable, avec une progression de 75% du nombre de brevets acceptés, alors que l'Allemagne n'a enregistré qu'une progression de 48% sur l'ensemble de la dernière décennie. Le géant allemand semble s'assoupir et il ne faut pas s'en réjouir, car nos destins sont liés.

Esquissons quelques mesures nécessaires pour renforcer l'attractivité de la France comme nation scientifique et technologique. La loi de programmation de la recherche prévoit une revalorisation de l'entrée dans la carrière étalée sur dix ans. Avec l'acuité de la compétition mondiale, la montée de la Chine et de l'Asie, un étalement sur une période aussi longue est tout simplement absurde. C'est maintenant que les jeunes chercheurs partent. C'est maintenant qu'on a besoin d'eux pour apporter du sang frais à la science française. L'argument financier (644 millions d'€) ne résiste pas une seule seconde, vu les tombereaux d'argent déversés pour financer le « quoi qu'il en coûte » Nous proposons de mettre en œuvre cette mesure sur les trois prochaines années. Parallèlement les scientifiques honorés par leurs pairs de prix devraient voir leur rémunération alignée sur celui des conseillers d'État. Mieux payer les chercheurs, est une bonne mesure, non pas tant pour les inciter à travailler plus, mais pour éviter que les meilleurs soient tentés de partir à l'étranger, en fait une vieille tradition universitaire ! Les clercs du moyen-âge ne dédaignaient pas déjà l'attrait des appâts pécuniers².

² Voir les travaux sur ce sujet de Maria Teresa Guerrini <https://www.unibo.it/sitoweb/mariateresa.guerrini/publications>

Ensuite, en se basant sur un retour des élèves dans les classes scientifiques dans le secondaire, il sera souhaitable d'augmenter les filières technologiques dans le supérieur en créant trois nouvelles universités technologiques dans les dix prochaines années, sur le modèle de celle de Compiègne. La dernière créée, à Troyes, remonte à 25 ans. A chaque fois qu'un nouvel établissement est créé, l'appel d'air fait se révéler des entrepreneurs universitaires et des voies nouvelles sont explorées en recherche.

L'échelon européen de la réflexion est indispensable. L'Europe en matière universitaire n'a créé que l'institut Européen de Florence, spécialisé en sciences humaines et sociales, un maigre bilan en 70 ans de construction européenne. La création de trois campus technologiques européens attractifs à l'échelle mondiale apparaît comme une nécessité. A cet égard, l'ETH à Zurich et l'EPFL à Lausanne pourraient servir de modèles. Evidemment, la France doit jouer toute sa partition dans le réveil technologique de l'Europe. Mais il ne faut pas oublier les pays de l'Europe centrale et orientale, très en retard. Les fonds structurels doivent aussi alimenter ces nouveaux campus et pas seulement des infrastructures de transport.

Enfin, il faut être conscient que la démographie européenne et maintenant française est vacillante. Notre réservoir de cerveaux faiblit. L'Afrique est le continent de l'avenir dans le domaine scientifique, avec un réservoir de jeunesse gigantesque. La France et ses partenaires francophones du Nord pourraient prendre l'initiative de créer, avec l'aide de la banque mondiale, trois universités de technologie dans l'Afrique francophone, en réseau avec les universités technologiques et les départements technologiques des universités francophones. Un formidable pari sur l'avenir où l'Europe et l'Afrique seraient des partenaires complémentaires. Un passage de témoin indispensable vers le monde des siècles pro-

chains, comme lorsque la Bibliothèque d'Alexandrie fondée en 288 avant notre ère devint pendant les siècles ultérieurs le plus grand foyer de culture scientifique grecque.

10

Financement de la recherche en France : un focus sur le système universitaire français

Valérie Mignon

La recherche nécessite la mobilisation d'importants moyens, humains et financiers. La question de son financement est donc cruciale, d'autant plus que cette activité requiert du temps et s'inscrit en conséquence fréquemment dans un horizon de moyen-long terme. Il s'agit en outre d'une activité risquée, les résultats des travaux de recherche n'étant évidemment pas connus avec certitude à l'avance. Investir dans la recherche peut, de ce point de vue, être considéré comme un « pari risqué »¹.

Quelques chiffres et un constat

En France, selon les chiffres du Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI), les entreprises consacrent 28,3 milliards d'euros au financement de l'activité de recherche et développement (R&D), ce qui correspond à 56% de la dépense intérieure de recherche et développement expérimental (DIRD) en 2017. Cette part est nettement inférieure à celle que l'on peut relever au Japon (78,3%), en Corée du Sud (76,2%), en Allemagne (66,2%) ou encore aux États-Unis (63,6%).

S'agissant de la dépense totale de R&D, son financement provient très majoritairement – à hauteur de 91% – des flux de financement interentreprises et de l'autofinancement, les 9% restants étant constitués de financements publics nationaux et des organisations internationales. Au sein des financements publics nationaux, on distingue notamment les dispositifs de

¹ Une version courte de cet article a été publiée dans The Conversation, le 19 mars 2021 (<https://theconversation.com/pourquoi-la-recherche-francaise-perd-du-terrain-sur-la-scene-internationale-157081>).

soutien direct comme les appels à projets, les contrats avec enjeux majeurs ou les subventions, des mesures de soutien indirect dont le Crédit Impôt Recherche (CIR) constitue l'élément le plus important.

Si l'on rapporte ces chiffres au PIB, la part des dépenses de recherche en France s'élève à 2,22% en 2016, ce qui est non seulement en retrait de la moyenne des pays de l'OCDE mais aussi loin de l'objectif de 3% fixé au début du XXIème siècle par la stratégie de Lisbonne. En outre, l'écart entre la France et les pays les plus ambitieux en termes de recherche, comme l'Allemagne, s'accroît à la faveur de ces derniers.

Il ressort globalement de ces chiffres que le niveau de financement public et privé de la recherche française est (trop) faible, ce qui peut en partie expliquer le fait que la France ait perdu du terrain sur la scène scientifique internationale, caractérisée notamment par la montée en puissance de la Chine et, dans une moindre mesure, de l'Inde ces dernières années.

Ce constat a de quoi alerter tant le rôle joué par la recherche est crucial dans l'ensemble des domaines. Si cela est évident dans les champs de la santé (matériel médical, médicaments, vaccination, enjeux multiples liés au vieillissement de la population, etc.), technologique, robotique, informatique, aéronautique, etc., les enjeux sont tout aussi cruciaux en matière environnementale et énergétique, d'information et de sa diffusion, de développement économique, de cohésion sociale... Enfin, l'un des domaines dans lequel la recherche occupe un rôle de tout premier plan est celui de l'enseignement supérieur et du système universitaire dans son ensemble. Cela peut d'ailleurs être illustré – et porter à débat – par le nom même du Ministère de tutelle des universités françaises : Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation. Concentrons-nous précisément sur le cas de l'enseignement supérieur et de la recherche en France.

Focus sur l'enseignement supérieur et la recherche

Dans sa lettre de mission du 19 février 2019 relative à l'évaluation de la recherche en France dans la perspective de l'établissement d'une programmation pluriannuelle de la recherche, la Ministre Frédérique Vidal rappelle que notre pays se positionne au septième rang mondial s'agissant des publications scientifiques derrière les États-Unis, la Chine, le Royaume Uni, l'Allemagne, l'Inde et le Japon. Si une telle place n'est pas « déshonorante », force est de constater que la France perd du terrain au niveau international et que les efforts de l'Etat en matière d'investissement dans la recherche restent insuffisants, en particulier par rapport à de nombreux autres pays comme l'Allemagne.

Quels sont les facteurs pouvant expliquer cette perte de vitesse de la recherche académique française ? Il n'est sans doute pas exagéré de parler de crise du système universitaire français. Expliquons pourquoi.

Dans le décret du 6 juin 1984 relatif au statut des enseignants-chercheurs, il est indiqué : « Les enseignants-chercheurs ont une double mission d'enseignement et de recherche. [...] Ils participent au développement scientifique et technologique en liaison avec les grands organismes de recherche et avec les secteurs sociaux et économiques concernés. Ils contribuent à la coopération entre la recherche universitaire, la recherche industrielle et l'ensemble des secteurs de production. » Le décret précise également que le temps de travail des enseignants-chercheurs est constitué « pour moitié, par les services d'enseignement » et « pour moitié, par une activité de recherche ».

Force est de constater que nous sommes loin de la réalité au sens où le temps que les enseignants-chercheurs peuvent

aujourd'hui consacrer à la recherche se trouve très fortement amputé par de multiples tâches administratives. Cela s'est accentué avec l'autonomie des universités qui s'est accompagnée, pour nombre d'entre elles, par des difficultés financières majeures. Ce sont ainsi chaque année plusieurs universités qui, conformément à la loi, voient leur budget arrêté par le recteur parce qu'elles ont connu deux exercices financiers consécutifs en déficit. Pour ne pas cumuler les déficits, les universités n'ont alors souvent pas d'autre choix que de sacrifier certaines missions en pratiquant des gels de recrutements et en diminuant les budgets alloués à la recherche. Les effets de domino sont immédiats : en gelant des postes, la charge de travail incombant aux enseignants-chercheurs en fonction s'accroît continuellement, obérant d'autant le temps dédié à l'activité de recherche. Le temps est ainsi devenu un bien rare pour tout enseignant-chercheur qui souhaite maintenir une activité de recherche, celle-ci ne s'exerçant désormais que le soir, le week-end ou durant les périodes de congés.

De façon liée, l'activité de recherche en France pâtit de carrières peu attractives sur le plan des rémunérations et des perspectives d'évolution, mais aussi de conditions de travail de plus en plus dégradées dans le secteur public et de lourdeurs administratives qui grèvent l'efficacité de la recherche. Les tâches administratives, lourdes et nombreuses, qui occupent désormais une partie considérable du temps des enseignants-chercheurs sont une réalité qui constitue l'une des causes des difficultés de la recherche universitaire française. Une telle situation a non seulement un impact sur les conditions de travail et les carrières des enseignants-chercheurs mais aussi, et de manière plus globale, sur le positionnement et le rayonnement des universités françaises au niveau mondial. Du côté de l'évolution des rémunérations, la situation n'a cessé de se dégrader. En 2013 et en parité de pouvoir d'achat, le salaire annuel brut d'entrée moyen des chercheurs en France représentait 63% de celui prévalant dans les pays

de l'OCDE. Ces divers éléments sont à même d'expliquer en grande partie la fuite des cerveaux français, mais aussi la faible attractivité des carrières scientifiques en France, tant pour les natifs que pour les chercheurs étrangers.

Sur le plan budgétaire, la situation est caractérisée par une diminution depuis une trentaine d'années des financements récurrents (« crédits de base ») accordés aux laboratoires de recherche qui doivent impérativement développer le financement sur appels à projets pour obtenir les crédits nécessaires à leur bon fonctionnement. Si une telle politique peut être à même d'impulser de nouvelles dynamiques et des collaborations entre chercheurs aux niveaux national et international, il n'en reste pas moins que plusieurs problèmes se posent. Les taux de succès aux appels à projets, notamment ceux financés par l'Agence Nationale de la Recherche, sont extrêmement faibles (16% en 2018), largement inférieurs à ceux prévalant au niveau international. Par ailleurs, répondre aux appels à projets nécessite du temps afin de monter un programme de recherche ambitieux et cohérent en prenant tout le recul nécessaire, temps dont ne disposent malheureusement plus suffisamment les enseignants-chercheurs comme nous l'avons évoqué précédemment. Soulignons aussi que le temps mobilisé pour répondre aux appels à projets s'accompagne de coûts indirects, encore plus en cas d'échec ; le coût principal étant celui lié au temps passé à la préparation du projet qui réduit le temps dédié à d'autres missions, mais qui s'accompagne aussi d'un temps – et donc de coûts – d'évaluation, de sélection et de suivi administratif et financier des dossiers soumis. Enfin, même si cela est une évidence, rappelons que ce temps consacré à la recherche de financements et de montage de projets est du temps qui n'est pas affecté à la recherche elle-même.

Peut-on encore renverser la tendance ?

Le constat dressé a de quoi inquiéter, mais la tendance peut encore être renversée pour que la France retrouve une place de tout premier rang dans la recherche au niveau mondial. Pour cela, il faut agir sur différents leviers afin de donner aux acteurs de la recherche tous les moyens et les outils nécessaires pour qu'ils puissent mener à bien leur activité.

En matière budgétaire, tout d'abord, il est crucial de renverser la tendance à l'érosion des crédits récurrents des laboratoires de recherche. Il est impératif d'accroître le budget public de la recherche, non seulement au travers des financements sur projets, mais aussi en augmentant les crédits de base des unités de recherche. De tels financements permettront ainsi aux laboratoires de retrouver les moyens nécessaires afin de développer des stratégies de recherche ambitieuses, d'encourager la prise de risque via l'investigation de champs disciplinaires émergents et permettre ainsi à la France de se hisser dans les premières places au niveau international. La recherche partenariale doit aussi être encouragée en développant et en facilitant les possibilités de partenariats entre divers organismes publics, mais aussi entre institutions publiques et privées.

Au-delà des aspects budgétaires stricto sensu, une attention toute particulière doit être portée aux moyens humains, à la revalorisation de l'ensemble des métiers de la recherche et à l'importance de la préservation du temps dédié à l'activité de recherche. Sur ce dernier point, cela doit s'accompagner d'une amélioration des conditions de travail et d'un renforcement des moyens alloués au soutien à la recherche. Il faut aussi admettre que la recherche s'inscrit dans un temps long, nécessitant donc des investissements pérennes sans exigence de rentabilité immédiate. La revalorisation des métiers de la recherche est impérative afin de rendre attractives les car-

rières dans le domaine, condition nécessaire à une dynamique de la recherche française à même de s'imposer sur la scène internationale.

Enfin, il convient de placer les enseignants-chercheurs et chercheurs au cœur du processus décisionnel en matière de recherche. Les politiques menées en la matière doivent les associer et ne pas se décider indépendamment des réalités du terrain, comme cela est malheureusement beaucoup trop souvent le cas aujourd'hui.

La crise sanitaire actuelle s'accompagne de difficultés économiques majeures qui rendent d'autant plus nécessaire un réinvestissement massif dans la recherche en France afin d'éviter que celles-ci ne conduisent à une forte baisse des budgets de R&D durablement néfaste à de multiples niveaux. La France doit relever le défi de la recherche, engageant pour l'avenir, en investissant massivement dans la connaissance et le savoir.



Les innovations, les ménages, les entreprises et l'ambition de l'État : une nouvelle répartition à définir

Erwann Tison

Un lien immuable entre innovation et croissance

Il est un sujet qui occupe grandement le débat politique et économique ces dernières années, c'est celui de la capacité d'une nation à innover. Le développement de grands projets technologiques est (re)devenu un objectif assumé par les sphères publiques et privées, dans l'ambition de renouer avec la prospérité économique et sociale. Nul besoin de convoquer Schumpeter Kondratieff et Juglar pour se rappeler le lien étroit existant entre innovation et croissance économique. Or, force est de constater qu'aux prémices de ce que Klaus Schwab juge être la 4ème de nos révolutions industrielles, notre croissance n'atteint plus les niveaux espérés, et sa distribution reste relativement inégale entre les puissances économiques. Pouvoir innover, de manière radicale ou non, semble être un remède à la stagnation séculaire et une façon de renouer avec une prospérité économique ardemment souhaitée.

La question vaccinale est un cruel révélateur de ce lien. Les pays ayant réussi à développer un vaccin efficace en un temps record sont ceux qui affichent les taux de vaccination les plus élevés. Or il est à gager que plus tôt une population sera vaccinée, plus vite elle pourra revivre à nouveau normalement, plus rapidement l'appareil productif pourra refonctionner à plein régime et favoriser ainsi le retour à la croissance.

Un terrain propice à l'innovation

Au-delà du « pourquoi » innover, la question du « comment » est toute aussi importante. Il est en effet plus facile de fixer des objectifs communs plutôt que de décliner un programme pour y parvenir. Les Français portent un regard de plus en plus accusateur sur le progrès technique. Selon le baromètre « sciences et société », réalisé annuellement par l'IPSOS et l'Institut Sapiens, seulement 50% des Français pensent que la technologie et la science permettront aux générations futures de mieux vivre qu'aujourd'hui (une baisse de 13 points en 7 ans). Ce recul de la confiance dans les grands projets technologiques est à mettre en regard avec notre capacité à favoriser l'éclosion de structures pouvant les porter. L'échec de l'écosystème pharmaceutique français sur le vaccin en est un cuisant rappel. La France dispose pourtant des ressources nécessaires pour innover.

Sur le volet innovation médicale, notre pays est très fourni comme le rappelle souvent Franck Mouthon, le président de France Biotech : nous possédons près de 1 700 entreprises innovantes (800 Medtech, 700 Biotech et 200 sociétés d'e-santé) qui emploient 50 000 personnes, et qui vont recruter 130 000 actifs supplémentaires d'ici 2030.

Sur un autre volet, celui des FAB-Lab, la France est également bien dotée. Ces ateliers de fabrication numérique, véritables laboratoires de poche permettant l'innovation, la collaboration et la production grâce à la mise à disposition d'outils numériques en libre accès, sont considérés comme des fers de lance de l'industrie 4.0. Avec 160 unités, la France dispose de 12% du stock mondial en la matière, ce qui la place deuxième derrière les États-Unis (179 unités), mais devant l'Italie (138 unités), l'Espagne (53), l'Inde (49), le Brésil (49), l'Allemagne (48), le Royaume-Uni (42), les Pays-Bas (33) et la Russie (31).

Sur le terrain de la formation enfin, là aussi la France n'a pas à rougir. Au-delà du mauvais classement de Shanghai et de nos piteux scores PISA, notre pays fait montre d'une excellence dans la formation des élites scientifiques, comme en témoignent les différentes récompenses internationales reçues par les chercheurs français et les positions qu'ils occupent dans les plus grandes entreprises de la tech au niveau mondial.

Une nouvelle bulle technologique est à espérer

Il existe donc un terrain fertile, mais qui manque d'irrigation. Les acteurs ont beau être présents et les bonnes volontés rassemblées au même endroit, s'il n'y a pas la bonne stimulation, il ne pourra y avoir de réalisations concrètes. Pour favoriser l'éclosion de nouveaux champions innovants, il faut donc arroser un maximum les différents écosystèmes d'avenir, à la lumière de ce qui s'est déroulé entre 1995 et 2001, lors de la première bulle internet.

Les investisseurs concernés doivent garder un souvenir douloureux de ce premier mois de mars du nouveau millénaire, où ils ont vu les gains réalisés par le NASDAQ depuis 5 ans se volatiliser en quelques mois. Des pertes qui n'ont pas été vaines sur le long terme d'un point de vue macroéconomique. Si certains ont comparé les investissements réalisés en cette période à un « arrosage large dans un désert aride », force est de constater que parfois l'irrigation peut toucher des zones fertiles et faire grandir de jeunes pousses naissantes. Certes plus de 200 start-ups « dot-com » ont fait faillite à la suite de l'éclatement de la bulle, mais d'autres se sont réveillées et ont affiché une croissance insolente. Google, Yahoo, eBay, Amazon ou Free, en plus d'être des rescapés de cette crise, sont ainsi devenues par la suite des places fortes de la tech.

La lecture macroéconomique de long terme plaide donc en faveur de ces investissements larges et non ciblés dans des secteurs d'avenir. Il y aura certes de nombreuses pertes en la matière, mais les gagnants seront des entreprises structurellement puissantes qui façonneront durablement leur marché. A nous de tout faire pour que ces prochains géants soient français. L'idée n'est pas de recréer une bulle (le contexte monétaire et financier serait moins enclin à son amortissement), mais bien de multiplier les investissements « aveugles » envers ces secteurs à fort potentiel de croissance, pour permettre aux jeunes pousses d'avenir d'obtenir les éléments nécessaires à leur développement.

Des coopérations à nouer entre grands groupes et petites entreprises

L'autre enseignement de l'épisode vaccinal a été l'importance des synergies entre petites et grandes entreprises dans le processus d'innovation. Les vaccins produits et commercialisés par les grands groupes ont d'abord été pensés et développés par des plus petites entreprises. BioNTec (1310 salariés), Moderna (1300 salariés) ou Bharat Biotech (700 salariés) ont ainsi réussi là où Novartis (110 000 salariés), Sanofi (100 000 salariés) ou Roche (94 000 salariés) semblent avoir échoué. L'agilité dans la recherche et le développement, caractéristique de ces start-ups, est essentielle au processus de recherche appliquée. Elle vient nourrir les grands groupes, qui au travers de ces nouvelles collaborations, peuvent assurer le changement d'échelle nécessaire à la propagation de ces innovations.

Une nouvelle mécanique qui n'est pas spécifique au domaine des Biotech. Dans le secteur des véhicules autonomes par exemple - dont la taille de marché pourrait atteindre plus de 900 milliards d'euros à l'horizon 2030 selon une estimation du ministère des Transports britannique – la position hégé-

monique d'acteurs comme Waymo ou Baidu est directement corrélée à leur collaboration antérieure avec de plus petites entreprises pionnières sur certaines technologies. La capacité à développer de grands projets technologiques n'est ainsi plus directement dépendante de la taille d'un groupe, mais de son aptitude à travailler et à coopérer avec des structures innovantes qui auront été aidées au préalable dans leur développement par un arrosage massif de fonds privés.

Les ménages, la clé de la domination technologique française

La clé du financement de ces projets technologiques d'avenir, essentiels à la prospérité économique de notre pays, dépendra de la capacité de l'État à juguler la risquophobie des ménages en matière d'investissements.

La crise du COVID a permis aux ménages français d'économiser plus de 100 milliards d'euros. Un trésor équivalent en volume au plan de relance voulu par le gouvernement, et qui risque bien de s'endormir aux côtés des 1 700 milliards € d'épargne (dépôts à vue et dépôts bancaires rémunérés) déjà constituée par les ménages et qui demeure improductive au regard des grands enjeux économiques et industriels qui nous attendent. Réussir la ventilation de cette épargne vers l'économie productive est le fantasme absolu de nos élus, qui redoublent d'imagination pour y parvenir. Armés d'outils fiscaux et réglementaires, certains s'imaginent déjà arracher de force cette manne financière de la poche des épargnants. Il est dommage de tomber encore dans l'écueil coercitif plutôt que de chercher à corriger les biais cognitifs des ménages en la matière.

Le Français est un investisseur frileux par nature (comme en témoignent les encours records du livret A). Appliquant à la lettre l'adage « un tiens vaut mieux que deux tu l'auras », il a besoin d'être rassuré pour adapter ses préférences inter-

temporelles et soigner sa risquophobie latente. Une nécessité pour l'inciter à se tourner vers des projets technologiques où l'investissement présente par nature un fort taux de risque, où il y a beaucoup d'appelés pour peu d'élus.

Pour y parvenir, l'Etat doit intervenir en tant que « co-assureur » de cet investissement. Nos amis anglais ont développé un dispositif intéressant, dont l'on pourrait s'inspirer pour inciter les ménages. L'Enterprise Investment Scheme (EIS) est un dispositif fiscal créé en 1994 prévoyant notamment la possibilité de déduire de son impôt sur le revenu une partie des pertes subies lors d'investissements dans des entreprises non-cotées. Encadré pour éviter les effets d'aubaine et calibré pour sied aux épargnants novices en matière d'investissements, un tel produit pourrait constituer une puissante incitation financière pour faire enfin profiter l'économie française de cette masse financière dormante. Taxer les gains, mais assurer une couverture partielle des pertes serait ainsi la doctrine la plus efficace pour un Etat souhaitant ventiler l'épargne disponible vers des jeunes pousses.

Au niveau européen, la poursuite d'un mécanisme de cofinancement public-privé de l'innovation est une piste intéressante à renouveler. Sur le principe du plan Juncker, des institutions européennes comme la BEI pourraient à nouveau créer un effet de signal en investissant dans des entreprises d'avenir aux forts besoins d'augmentation de leurs fonds propres. Un tiers de confiance de cette qualité avait rassuré les acteurs privés et permis de financer de manière pérenne de nombreux projets ambitieux.

Une répartition claire des rôles

Pour conclure, rassurons-nous en disant qu'à l'heure de la 4ème révolution industrielle, la France n'est pas un acteur sous-doté en la matière, mais mal organisé. Notre pays dis-

pose des ressources intellectuelles et industrielles nécessaires à l'émergence de champions internationaux dans les secteurs à fort valeur ajoutée. Leur optimisation ne tient qu'à la définition d'une nouvelle répartition des rôles. L'État doit financer la recherche fondamentale pour éviter qu'elle ne devienne un bien rival. Les start-ups et les petites entreprises peuvent tâtonner à partir de ces travaux pour alimenter la recherche appliquée. Les grands groupes doivent quant à eux venir en soutien pour aplatir le Hype Cycle et favoriser le passage à grande échelle et la commercialisation de ces innovations. De leur côté, les ménages, bien incités par le mécanisme de réassurance de l'État, viendront arroser de leur épargne, un maximum de ces entreprises innovantes pour faire grandir les plus viables d'entre elles. L'UE enfin, à travers ses différentes institutions, enverra les bons signaux au marché pour aider particulièrement les secteurs sensibles et garantir leur croissance au niveau européen.

Tous ces acteurs, s'ils se coordonnent autour de cette nouvelle clé de répartition, en tireront alors un triple dividende : financier par le retour sur investissement très important des projets ayant réussi, social par l'augmentation du bien-être induit par l'introduction de ces outils technologiques, et politique par la redéfinition d'une souveraineté technologique, boostée par la détention d'innovations de rupture indispensables. Il ne faut donc jamais gâcher une crise, surtout lorsque les enseignements de celle-ci nous permettent de préparer au mieux notre avenir technologique.

12

Quelles priorités technologiques pour l'autonomie stratégique européenne ?

André Loesekrug-Pietri

Les nouvelles technologies ne cessent de modifier notre façon de travailler, de communiquer et de collaborer. Elles exercent également une influence majeure sur l'autonomie stratégique des acteurs étatiques, c'est-à-dire sur leur capacité à prendre librement des décisions et à mettre en œuvre des politiques sans être soumis à des interférences étrangères¹.

Le groupe de dirigeants de startups deeptech, de directeurs de centres de recherche et d'universités, et de cadres dirigeants de grandes entreprises qui a créé la Joint European Disruptive Initiative (JEDI)² afin de mettre en place l'équivalent européen de la DARPA américaine (Advanced Research Projects Agency), a reconnu très tôt le rôle essentiel des technologies de rupture pour la force et la résilience de nos économies et de nos sociétés dans ce 21^e siècle exponentiel. Ils ont également été parmi les premiers à souligner leur impact potentiel asymétrique et hautement déstabilisant quand elles sont développées par des groupes ou des États hostiles à nos démocraties libérales.

Dans un monde caractérisé par une forte interdépendance économique et par l'importance des effets d'échelle, la pleine mesure de ces technologies émergentes ne s'obtiendra qu'au niveau européen. L'autonomie stratégique en matière de technologies critiques désigne la capacité des acteurs européens à posséder un certain degré de contrôle sur les technologies stratégiques, c'est-à-dire les technologies jouant - ou sur le point de jouer - un rôle essentiel pour le fonctionnement et la

¹ L. Poirier, Essais sur la stratégie théorique, Paris, Fondation pour les études de défense nationale, 1982.

² La DARPA Européenne, voir www.jedi.foundation

résilience de nos sociétés. Cela inclut également les technologies qui peuvent avoir un impact significatif sur nos institutions et valeurs politiques. « Posséder un certain degré de contrôle » n'implique pas automatiquement que l'Europe doit reproduire et développer une industrie entière pour chacune de ces technologies. L'autonomie stratégique dans les technologies critiques ne doit pas non plus être comprise en termes absolus, mais plutôt comme un concept flexible, comme une capacité que les acteurs doivent étendre autant qu'ils le peuvent pour accroître leur liberté de décision et d'action.

L'autonomie stratégique européenne en matière de technologies critiques commence par leur identification et la fixation des priorités. Ce document se propose d'identifier trois catégories technologiques sur lesquelles l'Europe devrait concentrer ses efforts : les infrastructures critiques, les secteurs technologiques stratégiques et, enfin, un certain nombre de briques technologiques clés (« piliers »), sans lesquelles un niveau suffisant de contrôle des infrastructures et des secteurs technologiques ne pourrait être atteint³.

Les infrastructure critiques

Le premier pilier fondamental de l'autonomie stratégique est le contrôle, la protection et le renforcement de nos infrastructures technologiques critiques.

Les câbles sous-marins : Les câbles sous-marins représentent une infrastructure critique d'information et de communication, avec un contrôle croissant de ces câbles par des acteurs non-étatiques (Google, Facebook).

Réseaux 5G et 6G : Le passage des communications cellulaires de 5^e puis de 6^e génération (5G et 6G) aura un impact majeur sur nos sociétés. À elle seule, la 5G contribuera à environ 5% de la croissance du produit mondial brut au

³ A. Loesekrug-Pietri, "Technology Strategies in China and the US, and the Challenges for European Companies", Ifri 2020

cours des 15 prochaines années⁴, notamment en raison de ses applications dans le domaine des soins de santé, de la gestion de l'énergie, de l'industrie et de la défense.

Satellites : La multiplication des appareils utilisant des systèmes de positionnement par satellite (GPS, Galileo, ou Beidou), le développement des services d'imagerie spatiale pour la défense, l'industrie et les échanges commerciaux, et le rôle vital des télécommunications accroissent notre dépendance aux satellites. L'Europe ne fait pas partie du « club » de pays capables de détruire un satellite ennemi (l'Inde est devenue en 2019 la quatrième puissance capable de détruire un satellite, après les États-Unis, la Russie et la Chine⁵) et ne possède aujourd'hui pas de constellations de satellites de communication.

Datacenters et cloud : La quantité de données générées par l'activité humaine augmente à un rythme toujours plus rapide et pourrait atteindre 175 zettaoctets (équivalent à $175 * 10^{21}$ octets) d'ici 2025⁶. Or, 90% des données générées dans le monde sont stockées dans des centres de données : notre degré de contrôle sur celles-ci dépendra donc de leur emplacement et du régime juridique qui s'applique à ces données, comme le fameux Cloud Act.

Calcul à haute performance : Les superordinateurs peuvent être considérés comme une ressource stratégique grâce à leur performance et à leur utilité en matière de cryptographie, de développement de nouvelles molécules pour la santé, de science des matériaux, de technologies d'intelligence artificielle et de modélisation du climat.

Réseaux d'énergie critiques : Les réseaux d'énergie sont essentiels au fonctionnement quotidien et à la résilience de nos sociétés ; mais comme l'a montré le piratage du ré-

4 ["Mobile Industry Generates \\$565 Billion in Additional Global GDP by unlocking the Right 5G Spectrum: GSMA Study", site Internet GSPA, 12 décembre 2018](#)

5 Ashley J. Tellis, "India's ASAT Test: An Incomplete Success", [Carnegie Endowment for International Peace website](#), publié le 15 avril 2019.

6 David Reinsel, John Gantz and John Rydning, "Worldwide Global DataSphere Forecast, 2020–2024: The COVID-19 Data Bump and the Future of Data Growth", The International Data Corporation, avril 2020

seau de distribution d'électricité ukrainien en 2015, ils seront de manière croissante sujets à des cyberattaques.

Les secteurs technologies stratégiques

Les technologies évoluent à un rythme toujours plus rapide. Il est essentiel d'identifier les principaux secteurs où des ruptures technologiques sont les plus susceptibles de se produire, et qui auront un impact sociétal, économique et stratégique majeur.

Systèmes d'intelligence artificielle (IA) : Les systèmes d'IA⁷, en particulier l'apprentissage profond (Deep Learning), constituent sans aucun doute le répertoire technologique qui a enregistré les avancées les plus substantielles ces dernières années, et leur impact augmente également à un rythme record : les technologies alimentées par l'IA pourraient augmenter la productivité du travail de 30% en moyenne par rapport à 2015⁸ et rapporter 15,700 trillions de dollars à l'économie mondiale⁹. La capacité d'anticipation et de modélisation de systèmes complexes deviendront des avantages stratégiques et économiques majeurs.

Les réseaux sociaux : Les plateformes d'information et de communication transforment notre accès à l'information : 48 % des Européens, et 87% des Européens de la tranche d'âge 15-24 ans, utilisent quotidiennement les réseaux sociaux¹⁰, ce qui souligne l'importance de ces plateformes de communication aujourd'hui et dans un avenir proche. L'impact d'une autre affaire similaire à celle de Cambridge Analytica serait donc énorme.

⁷ Ian Goodfellow, Yoshua Bengio and Aaron Courville, Deep Learning (The MIT Press, États-Unis, 2016), p.2-5

⁸ James Manyika et al., "Jobs Lost, Jobs Gained: What the Future of Work Will Mean for Jobs, Skills, and Wages", McKinsey Global Institute report, novembre 2017.

⁹ "The Mobile Economy 2019", GSMA Intelligence Report, 2019, p.43.

¹⁰ "Media use in the European Union", Standard Eurobarometer 92, enquête coordonnée par la Direction Générale de la Communication (DG COMM) de la Commission Européenne, automne 2019, p.6 et 21.

Les systèmes de reconnaissance faciale et de traçage : Si elles suscitent - à juste titre - beaucoup d'inquiétudes notamment en Europe, ces technologies de reconnaissance peuvent également être bénéfiques, en particulier dans le domaine de la santé : la reconnaissance faciale peut être utilisée pour suivre la consommation de médicaments d'un patient, soutenir les procédures de gestion de la douleur, détecter les maladies génétiques et soutenir les personnes à handicap. Par ailleurs, les applications de traçage des contacts sont considérées comme ayant joué un rôle important dans la limitation de l'épidémie de Covid-19 dans certains pays comme en Corée du Sud¹¹.

Technologies quantiques : Les technologies quantiques vont révolutionner notre façon de réaliser des activités informatiques, actuellement basées sur la logique binaire de l'algèbre booléenne et sur les architectures Von Neumann. Le paradigme quantique devrait permettre de réaliser, sur une base exponentielle, des algorithmes beaucoup plus efficaces pour résoudre d'importantes classes de problèmes¹², de permettre le développement de capteurs très précis, de révolutionner la cryptographie, et enfin d'améliorer la sécurité de nos communications¹³.

Technologies génomiques : Les « technologies du vivant » et la biologie de synthèse pourraient être celles qui ont le plus grand impact sur notre siècle, car elles annoncent la convergence entre biologie et digital. Les technologies d'édition de gènes telles que CRISPR/Cas9 et les lecteurs de gènes sont particulièrement puissantes. Plus récemment, l'approche révolutionnaire de l'ARN messager a été massivement mise en évidence par la pandémie de Covid-19 et bouleverse la manière et la vitesse avec laquelle nous développons de nouveaux vaccins¹⁴.

¹¹ Heesu Lee, ["These Elite Contact Tracers Show the World How to Beat Covid-19"](#), site Internet Bloomberg, 27 juillet 2020

¹² IRDS, ["International Roadmap for Devices and Systems – Executive Summary"](#), édition 2018, p.16.

¹³ Science & Technology Trends 2020-2040 – Exploring the S&T Edge", NATO Science & Technology Organization report, 2020, p.19

¹⁴ Voir par exemple Willy Shih, ["Could COVID-19 Spur a Revolution in Vac-](#)

Énergie propre : L'un des défis les plus pressants auxquels nos sociétés sont confrontées aujourd'hui est de limiter le réchauffement de la planète. Pour atteindre cet objectif, il est essentiel d'opérer un basculement radical vers la production, le transport et la distribution d'énergies propres. Au-delà de leur intérêt immédiat pour la décarbonisation, les énergies propres sont aussi une opportunité pour accroître l'autonomie énergétique européenne.

Les piliers technologiques

Toutes les technologies n'ont pas la même importance. Pour rester souveraine sur le plan technologique, l'Europe devra maîtriser les plus critiques, celles qui sont au cœur de plusieurs secteurs et qui ont le plus grand impact stratégique et économique. Un accent particulier devra être mis dessus, avec des investissements nécessaires parfois significatifs.

Semi-conducteurs <10 nm : Les dispositifs à base de semi-conducteurs sont les éléments constitutifs de nos systèmes de traitement de l'information (systèmes de calcul haute performance, appareils connectés, voitures, smartphones, et infrastructure de nos systèmes de communication...)¹⁵.

Accélérateurs d'IA : L'un des piliers technologiques essentiels alimentant le développement de l'IA est le matériel informatique spécifique à l'IA (appelé accélérateurs d'IA). La dernière décennie a vu l'essor des unités de traitement graphique (GPU), des circuits intégrés spécifiques aux applications (ASIC), tels que les unités Tensor (TPU) de Google.

Antennes 5G : les petites cellules 5G sont essentielles au déploiement efficace du réseau 5G, car elles constituent le point d'accès de faible puissance qui connecte les appareils

[cine Development?](#)", site internet de Forbes, publié le 16 février 2020.

15 IRDS, "International Roadmap for Devices and Systems – Application Benchmarking", édition 2020, p.10, et Li Du and Yuan Du, "[Hardware Accelerator Design for Machine Learning](#)", in Machine Learning – Advanced Techniques and Emerging Application, édité par Hamed Fahradi, IntechOpen, Royaume-Uni, 2018.

mobiles aux réseaux cellulaires plus larges. En permettant la densification du réseau d'accès radio, elles conduisent à des performances accrues en termes de couverture, de sécurité, de précision et de qualité de service, notamment dans les zones urbaines denses¹⁶.

Traitement du langage naturel : Le traitement du langage naturel (*Natural Language Processing*, NLP) basé sur l'IA désigne l'ensemble des outils permettant aux systèmes informatiques de reconnaître, comprendre et interpréter le langage humain. Le NLP constituera un changement stratégique dans la capacité des acteurs à comprendre un monde marqué par une accélération et une surabondance de données - le NLP permettra de contextualiser les situations et prendre des décisions éclairées en temps réel, ce qui sera sans aucun doute un avantage stratégique majeur¹⁷.

Protocoles de cybersécurité fonctionnant grâce à l'IA : Les algorithmes d'IA peuvent grandement améliorer la sécurité des réseaux d'information et de communication à quatre niveaux : utilisation de connexions biométriques au lieu de mots de passe ; détection plus précoce et plus rapide des cybermenaces et des activités malveillantes ; mise à jour continue de l'évolution des menaces par la surveillance et l'analyse du cyberspace ; renforcement des capacités de cybersécurité en adaptant le cadre d'authentification et en bloquant l'accès à un utilisateur au comportement suspect¹⁸.

Batteries de nouvelle génération et technologies vertes liées à l'hydrogène : Parmi les options énergétiques propres, l'électricité produite par des sources d'énergie renouvelables et l'hydrogène vert - c'est-à-dire l'hydrogène produit par électrolyse alimentée par des sources renouvelables - sont considérés par de nombreux observateurs

¹⁶ ["Setting the scene for 5G: opportunities and challenges"](#), International Telecommunications Union Report, 2018, p. 10.

¹⁷ William D. Eggers, Neha Malik, Matt Gracie, ["Using AI to unleash the power of unstructured government data"](#), Deloitte Insights, publié le 16 Janvier 2019.

¹⁸ Naveen Joshi, "Can AI Become Our New Cybersecurity Sheriff?", site Internet de Forbes, publié le 4 février 2019

comme l'une des meilleures solutions pour décarboniser nos sociétés. Les nouvelles générations de batteries seront probablement solides, avec une contredensité énergétique et un niveau de sécurité renforcés. Le stockage d'énergie permettra de balancer et donc d'augmenter la production intermittente des sources renouvelables. Dans les secteurs difficiles à décarboner (acier, ciment, transport lourd), l'hydrogène vert est particulièrement prometteur¹⁹.

Conclusion

Le concept de « technologie critique » est omniprésent, couvrant des technologies utilisées dans des secteurs allant des soins de santé à la décarbonisation de nos sociétés en passant par l'industrie. C'est également un concept en constante évolution ; le secteur technologique évolue à un rythme toujours plus rapide, générant de nouvelles idées et de nouveaux paradigmes que nous n'aurions jamais pu imaginer.

L'Europe dispose d'un grand nombre d'atouts et d'un véritable potentiel dans plusieurs technologies stratégiques évoquées ci-dessus : elle a une très forte activité de recherche et développement dans les secteurs technologiques des énergies quantiques et vertes, elle abrite certains des leaders mondiaux pour la 5G, et est le continent le plus avancé dans le domaine de la robotique ainsi qu'une puissance mondiale de l'espace. Mais malgré ces atouts, elle reste significativement dépendante des États-Unis et parfois distancé par la Chine pour la plupart de ses infrastructures numériques critiques, qu'il s'agisse des centres de données, du cloud computing, des plateformes d'information et de communication, mais aussi des supercalculateurs, de l'IA et des systèmes autonomes, de la biologie synthétique ou des câbles sous-marins.

¹⁹ Voir par exemple International Energy Agency, [“The Future of Hydrogen – Seizing Today's Opportunities”](#) rapport préparé pour le G20 au Japon (juin 2019) et Cédric Philibert, [“Perspectives on a Hydrogen Strategy for the European Union”](#), Etudes de l'Ifri, Ifri Center for Energy & Climate, avril 2020.

Pour exploiter son potentiel, protéger ses actifs et acquérir une véritable influence géopolitique, l'Europe a besoin d'une impulsion politique significative - et d'une révolution des méthodes et des mentalités. Il ne peut y avoir de progrès sans l'adoption d'une perspective stratégique et prospective dans le secteur technologique. Consciente de l'urgence de la situation, la nouvelle Commission a pris plusieurs mesures dans ce sens. Malgré ces premières bonnes dispositions, ces efforts restent insuffisants ou trop lents - en termes relatifs par rapport à la vitesse de plus en plus rapide à laquelle les technologies évoluent.

Le véritable défi consiste à investir dans les technologies de rupture, se fixer des priorités pour éviter le saupoudrage (« spray and pray »), finaliser la réalisation du marché unique dans les domaines technologiques et numériques, aujourd'hui fragmentés, pour avoir un vrai effet d'échelle. Il faut également simplifier à l'extrême les mécanismes de financement tout en rehaussant fortement le niveau d'exigence – actuellement, l'absence d'évaluations indépendantes de l'impact des politiques de R&D entrave toute opportunité d'amélioration, alors que nous parlons de budgets significatifs (200 milliards d'Euros investis par l'UE seule depuis 1984). Le manque de cohésion et de coopération entre les États membres (comme cela a été souligné dans les domaines de l'IA, du quantique, ou de l'hydrogène, où la plupart des États membres ont leur propre stratégie), entrave la capacité d'anticipation, alors qu'il est absolument impératif de se concentrer sur *the Next Big Thing*, sur les questions stratégiques de l'avenir proche et à moyen terme, plutôt que sur les batailles du passé.

C'est le cœur de la mission de JEDI, le projet de DARPA européenne, maintenant opérationnelle depuis début 2020 : son premier grand défi sur la recherche de traitements contre la Covid-19 a connu un succès mondial, et JEDI rassemble aujourd'hui plus de 4000 leaders technologiques et scientifiques dans tous les pays européens qui travaillent sur des

dizaines de grands défis à lancer. Au-delà du financement, nécessaire, du positionnement clair sur tous les sujets trop risqués pour le secteur privé, il est essentiel de faire preuve d'audace institutionnelle en démarrant cette agence d'innovation de rupture en dehors des structures administratives traditionnelles, clé pour un fonctionnement radicalement disruptif. Cette initiative doit être massivement soutenue par les dirigeants politiques, car l'Europe ne pourra revenir en tête que si elle libère les énergies de son écosystème technologique et s'éloigne d'une certaine bureaucratization de ses programmes de recherche. L'autonomie stratégique européenne ne sera être atteinte que par la maîtrise des technologies de pointe qui façonneront l'avenir.

L'innovation évolue rapidement, les facteurs clés de succès étant la capacité à se projeter dans l'avenir, l'agilité et la rapidité. L'Europe doit en faire autant si elle veut rester dans la course technologique du 21^e siècle.

13

France et systèmes nationaux d'innovation

Elie Cohen

Il y a 30 ans le leadership mondial dans les réseaux de Telemcom comme dans le secteur des vaccins était français et n'était guère contesté. L'efficacité du modèle colbertiste d'un côté, et l'institutionnalisation réussie du système pastorien de l'autre, étaient alors gage d'efficacité et de succès. 30 ans après la France est absente des technologies de la 5G et le leadership mondial est passé à Huawei. Pire encore, son champion national devenu leader mondial a disparu englouti par Nokia. Quant aux vaccins, la crise a vu la France désarmée, échouant en matière de recherche avec Pasteur et en matière industrielle avec Sanofi.

Comment expliquer cette double contre-performance et que peut-on apprendre de ces échecs pour réorienter notre système national d'innovation ? Les premières raisons données à ces revers, notamment dans une note CAE, tiennent à la modicité des moyens de recherche mobilisés, à leur déclin relatif au cours des dernières années¹. L'absence de moyens a certainement joué mais l'incapacité à repenser le système national d'innovation et son insertion au niveau européen dans un contexte marqué par la révolution technologique et la montée en puissance de la Chine a sans doute été décisif.

Dans cette note, on part d'un constat, le décrochage de l'effort de recherche français et l'affaiblissement de la France dans certains de ses domaines de spécialisation les plus marquants. On envisage dans un deuxième temps le lien entre performance et économie des différents systèmes d'in-

¹ Margaret Kyle et Anne Perrot « Innovation Pharmaceutique » Note du CAE N°62 Janvier 2021

novation en contrastant les modèles chinois et américain et leur évolution. Dans un troisième temps on s'interroge sur la difficulté à faire émerger un modèle européen malgré les proclamations volontaristes de l'Agenda de Lisbonne. Enfin, on avance quelques propositions pour rebondir, refonder le système national d'innovation et éviter les impasses du passé.

Courbe du sourire ou malédiction de la puissance moyenne ?

Que l'on assiste à une désindustrialisation relative, ce que nous avons pu établir dans une note précédente n'est pas en soi un problème économique. L'évident du cœur manufacturier des pays développés s'explique entre autres par la division internationale du travail, la montée en gamme des pays développés, le redéploiement vers des tâches de conception et de services aux entreprises². La vraie question dès lors est de comprendre pourquoi la France n'a pas su renouveler ses avantages compétitifs pour monter en gamme et en spécialisation.

Dans un travail récent mené avec Philippe Aghion et alii³, nous avons exploité les données de brevets triadiques par domaines technologiques comme mesure d'innovation. Les conclusions suivantes se dégagent de notre analyse des performances relatives de la France dans les différents domaines de spécialisation :

- (i) La France fait encore partie des 15 pays les plus innovateurs, mais sa position relative n'a cessé de se dégrader dans l'absolu et en relatif depuis vingt ans, il n'y a donc pas eu de remontée vers l'innovation à partir des positions perdues dans la manufacture.
- (ii) Avec le temps les spécialisations de la France se font plus étroites. Il n'y a guère aujourd'hui que le nucléaire et l'aéronautique qui peuvent être considérés comme des

² Cahier du Cercle des Economistes dirigé par J.H.Lorenzi. [Va-t-on vraiment réindustrialiser la France](#), 2021

³ Le Covid et comment repenser notre politique industrielle mimeo 2021

domaines où la France a su conserver le leadership technologique.

- (iii) Une exploration plus fine des données de brevets fait apparaître quelques autres points de spécialisation dans l'isolation thermique, les machines agricoles, mais aussi les véhicules autonomes, la transmission de données, et les logiciels de conception assistée par ordinateur.

Par ailleurs, un contraste fort apparaît entre les données de brevets en absolu et le nombre de brevets par habitants. En absolu, la France souffre de sa taille qui ne lui permet guère de rivaliser avec les États-continentaux, avant tout la Chine et les États-Unis. En termes de nombre de brevets par habitants, la France souffre de son insuffisante spécialisation par rapport à la Suisse dans la pharmacie, la Finlande ou la Suède dans les Telecom et de la perte de positions traditionnellement fortes dans les Telecom ou l'automobile.

Avec la montée en puissance de la Chine dans la 5G, l'affirmation de l'hégémonie technologique des USA dans la filière électronique mais aussi pharmaceutique, la France a de fait décroché. Cependant, les positions relatives maintenues dans les véhicules autonomes (navigation, reconnaissance d'obstacles ...), les logiciels de CAM/CAD et les composants de réseaux de données peuvent encore servir de points d'appui pour un renouveau industriel et une reconquête des chaînes de valeurs.

Ecosystèmes nationaux d'innovation

Pourquoi donc la France a-t-elle décroché, tant par rapport aux États-continentaux qui ont pu se forger une spécialisation nouvelle (comme la Chine dans la 5G) et pourquoi en matière vaccinale des start ups allemandes ou américaines ont-elles été plus performantes que les systèmes centrés sur l'Etat ?

Dans un livre remarquable « The run of the red queen » D. Berstiz et Michael Murphee⁴ décrivent les ingrédients de la stratégie colbertiste qui a permis à la Chine et à son champion national Huawei d'asseoir son leadership mondial en 5G et qui ne sont pas sans rappeler la performance française 30 ans plus tôt avec l'invention du GSM et la montée en puissance d'Alcatel. Ces ingrédients sont au nombre de 5.

1- Encouragement et financement public d'une recherche ciblée en vue de s'appropriier les meilleures technologies mondiales et transfert des résultats aux champions nationaux. Cette stratégie s'est accompagnée d'un investissement systématique des forums mondiaux de normalisation et d'une prise de brevets extensive. Faut-il rappeler ici que la Chine est devenue en 2019 le leader mondial de la prise de brevets.

2- Reverse engineering pour apprendre des autres grâce à des obligations de transfert de technologies. Les champions chinois actuels ont d'abord été des partenaires obligés d'entreprises européennes ou américaines venues conquérir le marché chinois.

3- Menace de développement d'une norme nationale pour inciter les multinationales à coopérer.

4- Stratégie de protectionnisme offensif pour contrôler l'accès au marché national et préparer l'autonomie nationale.

5- Plan accéléré de déploiement des nouvelles technologies pour consolider l'avantage initial et financer l'expansion à l'étranger. L'adoption précoce de la 5G, la décision d'équiper massivement le pays en antennes, la politique consistant à éteindre les réseaux 1G, 2G puis 3G - quand les européens font coexister les anciens réseaux - témoignent du volontarisme chinois et de l'implication forte de l'Etat.

La stratégie d'imitation, l'ouverture négociée du marché intérieur, l'effort massif de recherche et de formation, le bras de fer pratiqué sur les apporteurs étrangers de technologies as-

⁴ Yale University Press 2012

soiffés de ventes sur le plus grand marché potentiel mondial, les prix consentis aux champions nationaux, ont été autant de leviers pour passer de l'état de sous-traitant à celui de leader sur le marché local et d'entreprise nationale à groupe industriel mondial.

A l'inverse, le GSM après un remarquable succès européen n'a pas connu de suites car l'Europe a mis l'accent sur l'avantage du consommateur en fragmentant le marché, a laissé les opérateurs chercher les fournisseurs les moins disants, a accepté que les champions nationaux français ou autres abandonnent progressivement leur recherche sur les équipements... Bref, ici comme ailleurs l'Europe s'est révélée à son meilleur pour faire baisser les prix des services et a pratiqué l'indifférence coupable en matière de recherche et de maîtrise des nouvelles technologies de la mobilité. La découverte de l'ascendant pris par Huawei a conduit à des prises de décision dans le désordre pour autoriser ou non l'entreprise chinoise à déployer ses équipements en Europe au nom d'impératifs de sécurité. Quant à accorder une préférence aux champions européens, l'UE s'y refuse. Paradoxe, c'est Donald Trump qui s'est proposé pour aider Nokia (Société mère de Lucent ex-filiale d'Alcatel) à refaire son retard pour fournir les USA.

A l'inverse, les succès de BioNtech ou de Moderna illustrent les vertus du modèle recherche académique – start ups – venture capitalism – nasdaq – Barda. En effet, la réussite de ces start ups illustre une fois de plus que sans recherche fondamentale de qualité financée sur la durée il n'y a pas d'innovation de rupture (Stanford ou Harvard-MIT sont des foyers de création scientifique à l'origine des Succès de la Silicon Valley ou de la route 128). Elle montre que sans dispositifs de financement adéquats, la vallée de la mort peut être fatale à des start ups innovantes, par sous financement. Enfin, la qualité du financement de l'innovation ne dispense

pas d'une prise de risque audacieuse par les Etats pour accélérer le passage à l'industrie, ce que l'opération Warp Speed initiée par le Barda montre avec éloquence.

A l'inverse, la fossilisation de certains organismes publics, l'incapacité à déployer rapidement des moyens significatifs, l'excès de prudence réglementaire, les hésitations entre le cadre national et européen, la défiance à l'égard des big pharma interdisent la mobilisation de moyens pourtant existants en Europe. L'échec français en matière vaccinale illustre une triple faiblesse française : la pharmacie n'a jamais été une priorité de politique industrielle, la politique du médicament a été conçue en fonction d'impératifs budgétaires de maîtrise de la dépense, la recherche publique en matière de sciences du vivant a été abandonnée à des organismes publics chroniquement sous-financés. Ainsi le sort de Pasteur et Mérieux a été abandonné aux choix patrimoniaux du groupe mondialisé Sanofi, quant à la recherche vaccinale plus fondamentale, elle a largement reposé sur l'Institut Pasteur.

Alors que faire ?

L'échec de la stratégie de Lisbonne

L'échec de la stratégie de Lisbonne fonctionne comme un double analyseur de l'intégration européenne et des râtés de la coordination molle. La coordination macro-économique par l'exhortation n'a pas produit beaucoup de résultats sur la durée. Les politiques d'intégration positive (R&D, politiques industrielles, infrastructures transfrontières) ne peuvent avoir la même efficacité que les politiques d'intégration négative (politiques de libéralisation et d'unification du marché). La description d'un avenir souhaitable fondé sur la connaissance, la soutenabilité et l'inclusion permet de rédiger des communiqués consensuels mais elle ne constitue en rien une politique communautaire engageante.

En refusant de choisir entre les modèles d'innovation américains, chinois, coréen ... et en faisant comme si des moyens modiques et saupoudrés en R&D suffisaient dans un contexte d'ouverture sans restriction des marchés, l'UE s'est condamnée à reproduire les mêmes erreurs même si quelques pays tirent individuellement leur épingle du jeu.

C'est ainsi qu'au sein de l'Europe cohabitent des pays à la frontière technologique comme les pays nordiques, des pays qui excellent dans les activités de la seconde industrialisation comme l'Allemagne et des pays dont les niveaux de R&D restent très éloignés de l'objectif de Lisbonne comme les pays du Sud et de l'Est.

L'Europe est à nouveau sommée de choisir entre un fédéralisme fiscal qui rend acceptables les différences de spécialisation et de compétitivité, un délitement de la construction communautaire ou l'invention d'une souveraineté industrielle européenne.

A nouveau, l'Europe fait l'expérience du gap technologique hier face aux Etats Unis dans les TIC et l'Internet aujourd'hui dans le numérique et l'économie de plateforme. A nouveau, l'Europe entend se mesurer avec les puissances montantes hier le Japon avec les composants, l'informatique et l'EGP, aujourd'hui avec la Chine dans les Telecom, l'IA, la robotique....

La tentation est à chaque fois de mettre en place des programmes ad hoc, hier Brite, Euram et autre Eureka ; aujourd'hui les PIIEC dans les batteries, l'hydrogène, les composants... L'UE entend encore aujourd'hui préserver le « trésor » des politiques de la concurrence mais la volonté de répondre aux défis technologiques sans une avancée majeure dans l'organisation, les moyens et la gouvernance de la R&D, est vouée

à l'échec. De ce point de vue, le budget modique alloué à quelques entreprises et laboratoires qui initient des travaux sur la 6G témoignent du fait que la leçon des échecs actuels n'a pas été vraiment tirée.

Refonder l'écosystème d'innovation franco-européen

Nos analyses plus détaillées des différents domaines de spécialisation nous conduisent à formuler les recommandations suivantes :

1- Rien de durable ne peut être entrepris sans une priorité à la recherche fondamentale, à l'excellence scientifique. Atteindre l'objectif de Lisbonne en matière de dépense de recherche reste d'actualité. Mais cela ne suffit pas. La Note récente du CAE sur l'Industrie Pharmaceutique établit avec cruauté qu'alors que le secteur connaissait une mutation fondamentale avec le passage de la pharmacie chimique à la pharmacie biologique et génomique, la France a baissé la garde avec une réduction de 28% des crédits de R&D entre 2011 et 2018 alors qu'au même moment l'Allemagne accroissait son effort de 11%. Ce décrochage aggravait une situation initiale déjà fortement défavorable à la France. La note du CAE renforce le diagnostic en ajoutant que la collaboration entre Université et start ups est vitale alors qu'elle est culturellement difficile en France. Enfin, le financement de cet écosystème doit reposer aussi sur des entreprises de capital risque correctement incitées pour abonder les différents stades d'émergence et de croissance de l'entreprise innovante.

2- Le financement sur projet ne peut être un substitut au financement pérenne des équipes. De même, la priorité donnée au CIR néglige la prise en compte des autres éléments des écosystèmes d'innovation. Sanofi reçoit 160 M€ en CIR par an tout en ayant diminué de moitié ses effectifs de recherche

en France et alors que l'aide aux laboratoires publics était chichement accordée. On peut se demander si les outils sont adéquats.

3- Dans nos domaines de spécialisation forts, l'Aéronautique et le Nucléaire, la priorité est à la consolidation du leadership technologique et à la lisibilité des orientations de long terme. Si le Nucléaire a de l'avenir en France, il faut le dire et prendre des décisions dans ce sens et non caresser l'idée d'une électricité 100% renouvelable. Le Royaume Uni montre la voie en revendiquant le choix du Nucléaire pour assurer la base de sa fourniture électrique et en faisant appel à EDF pour la réalisation de cet objectif. Si nous voulons être leaders dans le moteur électrique dans l'automobile et le moteur à hydrogène dans l'Aéronautique il faut prévoir des moyens conséquents.

4- Dans les domaines où notre leadership a été perdu, comme les Telecom, il faut jouer la carte européenne en permettant le développement de solutions 5G européennes (Nokia Ericsson) et en poussant les feux là où nous avons un avantage relatif comme les réseaux privés, l'IOT... Il ne suffit pas de lancer avec quelques millions des projets 6G, la bataille de la 5G continue et il faut armer les acteurs européens

5- Dans les secteurs qualifiés de stratégiques, comme la pharmacie, c'est une politique globale qu'il faut articuler.

a. Volet recherche, nouvelles molécules, vaccins. Création et activation d'un BARDA européen. Le HERA a été créé mais d'une part les ordres de grandeur ne sont pas là et d'autre part, le risque d'involution bureaucratique n'est pas écarté. C'est un saut d'échelle qu'il faut faire en matière financière. Il faut surtout conserver l'esprit du BARDA qui est à des années lumière des principes du juste retour, du saupoudrage, et de la coordination bureaucratique d'une variété de programmes. Le Barda qui sert de modèle est une structure souple, dirigé

par un patron qui ne rend compte qu'au Président, il est animé par des chefs de projet qui ont toute latitude pour sélectionner les projets, les accompagner, leur apporter l'aide la plus utile en mobilisant les moyens fédéraux. Le Barda privilégie les innovations de rupture, il prend des risques, il peut tuer les projets qui déçoivent. L'opération Warp Speed reste un modèle du genre.

b. Volet innovation. Le passage à l'entreprise. L'épisode Valneva illustre l'incapacité à penser dans un même mouvement la recherche, l'innovation, et la construction d'une usine prototype avec à l'arrivée un résultat négatif : une entreprise nantaise réserve ses premiers vaccins aux britanniques qui ont financé la ligne de production en Ecosse.

c. Volet industriel. La localisation de nouvelles unités de production est un débouché de la recherche c'est aussi un élément de la politique du médicament. La négociation du prix d'une spécialité est l'occasion d'une négociation plus vaste économique et industrielle, scientifique et financière. La présence en France d'usines vieillissantes de produits chimiques et l'absence de capacités en bio-production est le résultat d'une politique de prix qui dissuade les entreprises innovantes de produire en France et qui de ce fait contribue au vieillissement de l'outil de production localisé sur le territoire national.

d. Volet commande publique et sécurité d'approvisionnement. En matière de fourniture de principes actifs et de médicaments, il faut viser la sécurité d'approvisionnement en diversifiant les fournisseurs, en constituant des stocks de précaution et en mutualisant au niveau européen ce qui peut l'être.

e. A l'avenir, l'impératif d'autonomie stratégique poussera les grands États individuellement ou dans des groupements régionaux à souhaiter localiser les outils de production plus près des consommateurs, cela conduira à remettre en cause les chaînes de valeur mondiales et à repenser l'ensemble de la chaîne de conception développement production.

On le voit, des systèmes nationaux d'innovation naguère performants se sont révélés inadaptés dans un contexte nouveau de mondialisation et d'intégration européenne et à l'inverse, les pays qui ont conservé la maîtrise de leur développement comme la Chine ou qui ont su sur la durée se constituer un système d'innovation branché sur le marché comme les États-Unis ont connu des succès plus durables.

Le défi pour l'Europe et donc pour la France est assez simple : croient-ils vraiment à leur programme d'autonomie stratégique et si oui entendent-ils mettre les moyens nécessaires financiers et organisationnels en inventant des outils performants à l'échelle européenne et nationale ?

Si l'UE est à la bonne taille pour affronter les défis majeurs évoqués dans cette Note, il ne s'en suit pas que l'échelon national ait perdu sa pertinence. Les exemples nordiques, suisse ou coréen témoignent du contraire, à condition de consolider ses spécialisations et pour l'État, à déployer une politique de développement conséquente.

Répondre
aux enjeux
d'aujourd'hui

14

Climat – énergie, la technologie peut-elle répondre à tout ?

Claire Waysand

Pour parvenir à la neutralité carbone en 2050, la plupart des scénarios s'accordent sur la nécessité à la fois de réduire les consommations énergétiques (de l'ordre de 30-40%) et de décarboner la production énergétique (pour les 60 à 70% restants).

Il nous reste un peu moins de 30 ans, une génération, pour y parvenir – et le scénario de l'Accord de Paris (bien en deçà de 2 degrés) nécessite bien évidemment de ne pas attendre les dernières années pour infléchir significativement les trajectoires, et donc une action résolue dès à présent.

Ceci impose que les comportements des acteurs privés (entreprises et ménages) et les politiques publiques s'alignent vers un tel objectif. Les flux d'investissement à rediriger sont considérables et l'action publique seule n'y suffira pas. A contrario, la conjugaison de mécanismes de prix (dont, crucialement, celui du carbone, avec un accompagnement social adapté), de soutiens budgétaires ou réglementaires aux technologies émergentes mais prometteuse, de réglementations sont de nature à contribuer à mobiliser l'investissement public comme privé à la hauteur des besoins, et à orienter la recherche et l'innovation vers les objectifs que nous nous fixons collectivement.

Consommer moins d'énergie d'abord...

Aujourd'hui, les gains d'efficacité énergétique se situent aux alentours de 2% par an alors qu'il faudrait parvenir à 3,6 % par an¹. Globalement, l'AIE estime qu'il faudrait doubler les

¹ AIE World Energy Outlook 2019

investissements publics comme privés dans l'efficacité énergétique d'ici 2025 et les doubler à nouveau d'ici 2040². Si l'on prend l'exemple des bâtiments, ils sont rénovés au rythme globalement de 1% chaque année en Europe. Il faudrait quatre fois plus de rénovations d'ici 2030³. Il s'agit là d'innover tant dans les techniques utilisées pour les rendre plus efficaces que dans le cadre législatif et réglementaire, la façon de mener les chantiers, la formation des personnes, pour accélérer.

Aider nos clients à gagner en efficacité énergétique c'est une partie des métiers d'Engie. Quand Engie prend en charge un campus d'université américaine, ou mène des actions d'efficacité énergétique pour plus de 60 lycées en région Centre Val de Loire, une communauté de commune du Grand-Est ou encore une ville comme Angers, nous identifions des gisements d'économies d'énergie et de décarbonation et nous nous engageons, dans la durée, sur des résultats. Les solutions varient selon les contextes et les besoins - mieux isoler, mieux identifier les besoins, remplacer de vieilles chaudières, changer l'éclairage public... - mais dans tous les cas, le numérique tient une place particulière dans la recherche des économies d'énergie. Il permet tout d'abord une compréhension fine de la consommation, via la collecte et l'analyse des données d'usage, qui permet ensuite de l'optimiser. Nous réalisons des doubles numériques de plus en plus réalistes des installations et des territoires de nos clients et sur lesquels nous testons nos hypothèses et nos solutions. Avec des données réunies à l'échelle du groupe et sur un grand nombre de clients, nous pouvons créer des modélisations extrêmement précises des besoins énergétiques, ce qui permet de dimensionner au mieux les installations. Nous travaillons à construire des *Energy Management Systems*, des algorithmes prédictifs qui permettent une optimisation poussée des flux énergétiques d'un site ou d'un bâtiment.

² AIE Efficacité énergétique 2018

³ AIE World Energy Outlook 2018

Le numérique a ses propres enjeux de sobriété énergétique et Engie accompagne de grandes entreprises du numérique dans cette voie. Il est néanmoins un élément essentiel d'une décarbonation effective sans perte de confort voire souvent en permettant son amélioration.

Produire une énergie moins carbonée ensuite....

S'il y a bien un domaine dans lequel les prix relatifs évoluent rapidement, c'est celui des énergies. Si un décideur public avait dû, il y a 10 ans, décider du mix énergétique décarboné optimal pour la France, qui permette d'assurer la compétitivité de son économie et le pouvoir d'achat de ses ménages, gageons qu'il aurait pu se tromper... Le coût du solaire photovoltaïque a ainsi baissé de 80% au cours des dix dernières années et l'éolien terrestre de près de 40%⁴ ! De fait pour le solaire photovoltaïque et l'éolien terrestre, les coûts du kWh produit sont en passe de devenir les plus bas dans le monde. L'éolien en mer bénéficie également des progrès technologiques ayant conduit à une réduction des coûts considérables tout en offrant des puissances et un facteur de charge bien plus élevés que les autres technologies, ce qui permet d'anticiper un avenir prometteur à ces moyens de production.

Certaines technologies sont en revanche encore peu matures. C'est le cas de l'hydrogène renouvelable, avec des TRL (technology readiness level) encore bas. Il suscite aujourd'hui de grands espoirs, à juste raison. Il est un peu le chaînon manquant d'une transition énergétique réussie, notamment car il sera capable de décarboner les secteurs les plus énergivores. Pour créer les conditions de sa viabilité économique c'est sur l'ensemble de la chaîne de valeur qu'il faut réduire les coûts, en améliorant l'efficacité des différentes étapes

4 IRENA, Coût de production des énergies renouvelables en 2019

de production, en abaissant les coûts d'investissement et en identifiant le plus grand nombre de débouchés et d'intégrations chez l'utilisateur.

Nous pouvons être optimistes sur la capacité des technologies les moins matures à suivre le même chemin que les autres technologies. Il y faut néanmoins des conditions, d'ailleurs assez classiques : dé-risquer, baisser les coûts en réunissant les acteurs pour la R&D, assurer un soutien budgétaire et dans l'idéal introduire un prix du carbone pour refléter sur les marchés la réalité de l'impact environnemental.

En tout état de cause, alors que l'on ne sait pas quels seront les prix relatifs des différentes technologies de production d'énergie en 2030 et *a fortiori* en 2040 et en 2050, il serait dangereux de croire que nous pouvons aujourd'hui désigner la technologie ultime, pick a winner. Il nous faut rester ouvert et soutenir un vaste éventail de solutions énergétiques. Il ne s'agit d'ailleurs pas que de prudence technologique mais aussi de garantir un système énergétique résilient et à prix maîtrisé car diversifié. L'électricité a pour immense défaut d'être aujourd'hui difficilement stockable, à des coûts encore non compétitifs. Disposer d'une ou plusieurs briques de gaz renouvelables, biométhane demain et autres méthanes de synthèse et hydrogène renouvelable après-demain, est un atout considérable car les gaz sont stockables, transportables et très rapidement mobilisables (ou *dispatchables*).

Aujourd'hui premier développeur en France d'énergie éolienne terrestre et de solaire, et investi dans le développement du biométhane et de l'hydrogène renouvelable, Engie a plus de 30% de sa production énergétique dans le monde d'origine renouvelable et un objectif de doublement d'ici 2030.

Le numérique est là encore un allié de poids. L'augmentation de la part des renouvelables dans le mix énergétique

est source de défis opérationnels en raison de leur intermittence. Le numérique, et la data notamment, contribuent à y répondre en liant mieux offre et demande. Avec nos plateformes Darwin ou notre *Renewable Data Hub*, nous sommes capables de lisser les intermittences et d'en limiter les conséquences.

Adapter les énergies aux besoins des différents secteurs

À côté de ces considérations à l'échelle macroéconomique, une analyse sectorielle est également nécessaire, notamment pour les secteurs dont la décarbonation paraît la plus difficile.

Il s'agit tout d'abord de la mobilité lourde. Le remplacement de tous les véhicules à moteur à explosion est nécessaire mais l'électrique ne répondra pas à tous les besoins. Pour le fret, les transports longue distance et l'aérien, le méthane renouvelable et l'hydrogène renouvelable sont les seuls à présenter les densités énergétiques nécessaires. Demain des carburants de synthèse pourront être conçus à partir d'hydrogène renouvelable (le *power-to-liquid*). Des questions de ce type se poseront également au secteur de la construction car on sait que la production de béton est très énergivore, à l'agriculture et à certaines industries lourdes.

Les solutions viendront notamment de mécanismes de circularité : optimisation des process, biosourçage durable des matières premières, réemploi des déchets agricoles, de la chaleur et des gaz fatals, etc. Dans d'autres cas, limités, le stockage et la réutilisation du carbone pourront être à terme utiles pour décarboner les dernières émissions de CO₂, celles très chères ou trop difficiles à supprimer.

Au total, certaines technologies sont matures, d'autres émergent, de nouvelles encore verront le jour dans les prochaines

années pour faire face aux grands défis de la transition énergétique : consommer moins d'une part, verdir les énergies et assurer l'adéquation de l'offre et de la demande à tout moment d'autre part.

Y arriver nécessite que des signaux puissants et sans ambiguïté soient envoyés à l'ensemble des acteurs, publics et privés. La réglementation aura son rôle à jouer, pour soutenir les technologies pas encore matures mais prometteuses, et pour élever progressivement le niveau d'exigence environnementale. Mais il paraît difficile de se priver de la mise en place d'un prix du carbone. Le débat revient aujourd'hui par le biais d'un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières de l'Union européenne – qui permettrait un niveau de prix ambitieux du carbone dans l'Union sans pour autant que soient créées des distorsions de concurrence et des incitations à la délocalisation de la production (ce qui mettrait en échec son impact mondial) et dont le but, rappelons-le, ne serait pas d'ériger un mur protectionniste mais au contraire d'inciter la formation d'un « club carbone » de pays acceptant un niveau de prix du carbone. Il paraît difficile de se passer de l'utilité pour guider les entrepreneurs comme les consommateurs d'un tel prix. C'est avec le bon signal-prix que le marché pourra trier parmi les technologies de décarbonation celles qui sont les plus économes et les plus efficaces. Le développement des indicateurs ESG et la définition d'une taxonomie européenne auront eux aussi un rôle à jouer pour guider les investissements, en distinguant non seulement les investissements déjà alignés avec la neutralité carbone, mais également ceux de transition, qui permettent d'y arriver en baissant substantiellement et rapidement les émissions de gaz à effet de serre.

La décarbonation est un défi tel qu'il nécessite que nous stimulions par l'ensemble des outils des politiques publiques le progrès technique et l'affectation des ressources vers cet

objectif prioritaire, en assurant une adhésion citoyenne renouvelée. L'engouement des générations qui arrivent sur le marché du travail pour ce sujet me rends optimiste – quand nous avons divisé par deux notre empreinte carbone, nous avons vu chez Engie affluer trois fois plus de CV : les talents sont là, pour nos centres de recherche et pour l'innovation !

15

Quelques leçons à tirer du débat sur la 5G

Françoise Benhamou

A l'automne 2020, la vente aux enchères des premières fréquences 5G (la cinquième génération de communication mobile) aux opérateurs français Orange, SFR, Bouygues Telecom et Free a rapporté à l'Etat 2,786 milliards d'euros. Il n'en fallait pas moins pour enflammer les passions et polariser les opinions entre partisans du progrès et tenants du « retour à la lampe à huile », pour reprendre l'expression employée par le Président de la République¹. Le débat social était bien mal agencé, conjuguant une politisation inutile de questions en large partie techniques, une insuffisante éducation scientifique des Français conduisant à une méfiance quasi épidémique vis-à-vis de la technologie, et un déficit d'information et de transparence, avec le risque que le poids du sociétal porte préjudice aux développements économiques.

L'adoption de la technologie revêt pourtant un caractère très progressif : chaque opérateur doit installer 3 000 nouveaux pylônes dans les 2 ans, puis atteindre les 8 000 en 2024 et les 10 500 en 2025. Tous les sites, y compris ruraux, devraient être couverts par la 5G au plus tard en... 2030. Au niveau mondial, selon les projections de la GSMA (association qui représente plus de 750 opérateurs dans le monde), la 5G ne représentera que 14% des technologies mobiles en 2025, et la 4G continuera de progresser². Et comme souvent, le débat est contradictoire : on ne veut pas de la 5G, soupçonnée de tous les maux, mais on se plaint des lenteurs de son arrivée et des inégalités territoriales qui en accompagneront le déploiement.

¹ Discours d'Emmanuel Macron devant un parterre d'entrepreneurs, 14 septembre 2020.

² Cité par Simon J.P., « 5G : quels usages pour les médias ? », La Revue des médias, 11 juin 2019.

C'est donc avec défiance que le débat public a abordé la 5G. Une double suspicion a pesé, portant sur l'effet des ondes et sur la sécurité (1). On peut y voir une méconnaissance des futurs usages (2). Les enjeux de la 5G auront mis à nu des lacunes de l'appareil productif français auxquelles il est urgent de remédier (3).

Faiblesse de l'anticipation du débat societal

Concernant les effets sanitaires, l'inquiétude est légitime à défaut d'être nécessairement fondée, et mérite des réponses scientifiquement étayées. L'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) a lancé des travaux d'expertise visant à évaluer les risques liés à l'exposition des populations aux champs électromagnétiques de la 5G³. On lit dans son rapport préliminaire datant d'octobre 2019 que les premiers travaux « ont mis en évidence un manque important, voire une absence de données relatives aux effets biologiques et sanitaires potentiels dans les bandes de fréquences considérées. » Un second rapport est attendu alors que la 5G commence à être accessible aux Parisiens, en mars 2021.

Un autre rapport relève que « les éléments disponibles à ce jour permettent d'estimer que l'introduction de la 5G en bande 3,5 GHz avec antennes actives ne générera pas de rupture en matière d'exposition dans les zones urbaines, où elle sera majoritairement déployée, par rapport aux évolutions observées avec les réseaux existants, mais peut contribuer à une augmentation du nombre de points atypiques, ce qui devra faire l'objet d'une vigilance particulière.⁴ » Le même rapport note que s'il n'existe pas d'effets néfastes avé-

³ Anses, Saisine n° 2019-SA-0006, Rapport préliminaire, Octobre 2019.

⁴ Conseil général de l'environnement et du développement durable, Conseil général de l'économie, Inspection générale des affaires sociale, Inspection générale des finances, Mission sur le déploiement de la 5G et en France et dans le monde dans ses aspects techniques et sanitaires, 2020.

rés de court terme, des débats persistent au sujet des effets de long terme.

Reconnaissance des lacunes en matière de données, caractère tardif des publications, ignorance des effets de long terme, interrogations au sujet des points « atypiques », il n'en fallait pas moins pour alimenter des doutes, bien que nombre d'études internationales concluent à l'innocuité des ondes sur les personnes. « Est-il normal, maintenant que la décarbonation est dans tous les esprits, que la mise en place de la 5G ne s'accompagne en France d'aucune évaluation mettant en balance le supplément de service rendu avec les inconvénients environnementaux additionnels – car il y en a ? »⁵, demandent Hugues Ferreboeuf et Jean-Marc Jancovici dans un article paru dans *Le Monde*.

Quant à la sécurité, elle renvoie à des considérations géopolitiques. Le chinois Huawei a été gravement mis en cause, tout particulièrement aux États-Unis, sous deux aspects : le constat de failles importantes des réseaux, dont l'entreprise a reconnu l'existence, et surtout des soupçons de cyberespionnage – au moins potentiel, d'autant que la loi chinoise impose aux entreprises comme aux individus une coopération en matière de renseignement. En France, des dispositifs législatifs ont été adoptés afin d'éliminer les risques d'espionnage, de piratage et de sabotage qui peuvent résulter des nouvelles fonctionnalités offertes par la 5G. Le Conseil constitutionnel les a validés en février 2021. Mais la décision était pour le moins tardive : SFR et Bouygues Telecom vont devoir retirer les antennes Huawei de réseau mobile 5G déjà installées.

Autre sujet de préoccupation, la multiplication des usages accroît mécaniquement les risques de cybersécurité⁶. Les usages ludiques et de loisirs gagneront de la rapidité : le

⁵ Ferreboeuf H. et Jancovici J.M., « La 5G est-elle vraiment utile ? », *Le Monde*, 09 janvier 2020.

⁶ EU coordinated risk assessment of the cybersecurity of 5G networks, NIS Cooperation Group, octobre 2019.

chargement d'un film en HD qui prend six minutes avec la 4G ne mettra plus que quelques secondes. Mais il y a un envers à ce décor : la 5G pourra tout à la fois, dans le champ des médias, développer le streaming et le téléchargement, légal et illégal, soulevant des questions de protection de la propriété intellectuelle⁷. La facilité d'accès aux données et de création de contenus pourra de surcroît ouvrir plus encore qu'aujourd'hui la voie aux fausses nouvelles et aux contenus haineux. La régulation devra être renforcée.

Une technologie pour quels usages ?

Une technologie n'existe qu'à travers les usages qu'elle permet. La 5G n'est pas seulement une 4G plus performante. Techniquement, elle est une avancée majeure de la performance en termes de débits et de latence (un aller-retour du message qui devient plus rapide)⁸. Une note de l'Institut Montaigne⁹ insiste sur l'importance non seulement de la réactivité nécessaire à des applications exigeantes, mais aussi sur la capacité de slicing (découpage en tranches du réseau en fonction des usages) et de traitement des données à la périphérie (sans que celles-ci transitent par un data center éloigné).

Ces caractéristiques font de la 5G une innovation de rupture, susceptible d'emporter avec elle une vague d'innovations dans divers secteurs de l'économie et de susciter le développement de nouveaux marchés. L'Arcep distingue trois grandes familles d'usages 5G. Le Enhanced Mobile Broadband, qui correspond aux applications et services qui nécessitent une connexion toujours plus rapide, pour l'ultra haute définition,

⁷ Parmi les moteurs de la croissance mondiale des données mobiles (2017-2022), figurent les vidéos, qui représentent 59% du trafic en 2017, et monteraient à 79% en 2022. (Source : Cisco, Mobile Visual Networking Index (VNI) Forecast 2017-2022).

⁸ La 5G offre un débit maximal théoriquement 10 fois supérieur à la 4G, soit 10 Gbit/s et une plus grande réactivité (temps de latence divisé par 10) (Arcep).

⁹ Achour Messas, Julien Huvé, Laurent Inard et David Luponis, [L'Europe et la 5G : passons la cinquième !](#), Mai 2019

la réalité virtuelle ou augmentée, les Massive Machine Type Communications, qui regroupent principalement les usages liés à l'Internet des objets, conjuguant une couverture étendue et des débits relativement restreints, et les ultra-reliable and Low Latency Communications, comprenant les applications nécessitant une réactivité très importante et une garantie de transmission du message.

Plus concrètement, on attend de la 5G des développements industriels majeurs (connectivité des machines et pilotage à distance des outils industriels, assistance à la maintenance grâce à la réalité augmentée), un affinement de la mise en œuvre d'autres technologies (tels les smart grid - réseaux électriques intelligents- nécessitant une connaissance des besoins en temps réel), des avancées dans les usages domestiques, un déploiement massif de l'Internet des objets. La 5G permettra de conforter les usages de la voiture autonome et d'améliorer la connectivité si précieuse en e-santé et en téléchirurgie. Mentionnons aussi les progrès à en attendre en matière de connectivité des territoires, de ville intelligente, d'agriculture connectée et d'accès aux services publics. Au-delà de cette énumération, certains services sont encore largement ignorés, malgré la multiplication des expérimentations.

Mise à nu des lacunes françaises

A côté des débats mentionnés plus haut, la 5G révèle plusieurs lacunes françaises sur le plan des technologies nouvelles et de leur appropriation.

Les ravages de la guerre des prix

Quel sera le modèle économique de la 5G ? Les investissements très élevés des opérateurs (fréquences, équipements) devront être amortis, d'autant que leurs coûts de réseau de-

vraient augmenter de 60% à 300%¹⁰. En France, la logique de guerre des prix des forfaits, initiée par Free lors de son entrée sur le marché des télécoms, ne facilitera pas la mise en œuvre d'un modèle soutenable. Celui-ci devra sans doute passer par un couplage avec les contenus, dans le cadre d'une logique de convergence industrielle¹¹.

Une désindustrialisation dans les faits et dans les têtes

Les enjeux de souveraineté vont au-delà de l'affaire Huawei et de la vulnérabilité des réseaux évoquées plus haut. Face à des acteurs américains et chinois puissants, la France doit affronter une autre menace, celle du retard par rapport à divers pays d'Europe (Allemagne, Royaume-Uni, Espagne, Suisse, Italie), aux Etats-Unis, à la Corée du Sud¹², ou à la Chine.

L'arrivée tardive de la 5G participe du recul industriel français. Alcatel a fusionné avec l'américain Lucent en 2006, et le nouvel ensemble a été racheté par Nokia en 2015. Face à Ericsson (Suède), Nokia (Finlande) et Huawei (Chine), la France semble bien absente. Comme souvent, les enjeux industriels ont été sous-estimés, d'autant qu'il s'agit d'une technologie évolutive qui va s'enrichir progressivement. On peut rapporter cette sous-estimation au fait que les développements seront plus spectaculaires pour l'industrie que pour les usages individuels. On peut aussi y voir le symptôme d'un pays qui ne s'est pas seulement désindustrialisé, mais dont la désindustrialisation est entrée dans les têtes.

Quelle politique publique mener ? La Direction générale des entreprises du ministère de l'Economie a dégagé 600 millions d'euros de subventions publiques d'ici à 2022, dans le

¹⁰ McKinsey, *The road to 5G : The inevitable growth of infrastructure cost*, février 2018.

¹¹ cf. Benghozi P.J. and Benhamou F., « Media and the Internet Access Providers in an era of convergence », in Campos-Freire F., Rodríguez-Castro M., Tüñez-López M. *The value(s) of Public Service Media in the Internet Society*, ed. Palgrave, à paraître.

¹² Pays le plus avancé dans les déploiements de réseau et la commercialisation de cette technologie sur des fréquences similaires à l'Europe. Source : Arcep.

cadre du plan de relance ; des projets 5G ont été sélectionnés. L'objectif est de « travailler sur des solutions souveraines dans les télécoms et retrouver une place dans la chaîne de valeur ». L'organisation de la recherche-développement doit être questionnée. Le Royaume-Uni a annoncé la création d'une agence nationale pour l'innovation de rupture inspirée de l'Agence américaine de recherche pour la défense (DARPA), créé aux États-Unis pendant la Guerre froide pour rattraper le retard pris contre l'Union Soviétique dans la course au domaine spatial, et dont Philippe Aghion note que des inventions comme le laser ou le GPS en sont issues directement ou indirectement¹³. L'agence vise à favoriser les innovations de rupture en laissant une grande liberté d'action pour des projets très risqués et à fort enjeu sociétal. C'est dans cette direction qu'il faut aller, dans le but de dépasser tout à la fois, comme le souligne Armand Hatchuel, le corporatisme et la pression sur les publications qui freinent la recherche dans le champ académique, et le court-termisme des industriels¹⁴.

Conclusion

La 5G revêt des enjeux de compétitivité majeurs pour les entreprises. Mais comme en d'autres domaines, l'importance de la technologie et l'intrication des enjeux géopolitiques et économiques rendent nécessaire une coopération européenne ; or l'Europe agit en ordre dispersé, et il n'existe pas de marché unique des télécoms. Une condition du meilleur positionnement industriel de l'Europe dans un monde multipolaire en pleine recomposition réside dans la capacité de coordination et de coopération en matière technologique. L'arrivée de la 5G en est une des étapes.

¹³ Cf. Aghion P., *Le Pouvoir de la destruction créatrice*, Odile Jacob, 2020.

¹⁴ Armand Hatchuel, « Une agence nationale pour l'innovation de rupture, pour faire quoi ? », *Le Monde*, 10 mars 2021.

16

Comment réindustrialiser la France ?

Lionel Fontagné

La désindustrialisation de la France est un débat ancien¹, remis au premier plan de l'actualité par la crise sanitaire. Les capacités industrielles de la France sont apparues notablement insuffisantes pour répondre à la demande de matériels de protection individuelle, de médicaments, enfin de vaccins. Les débats entourant ce décrochage ont largement confondu deux questions. Le pic de demande pour les produits liés à la pandémie, dans une première phase, était tel qu'aucun pays européen n'était en mesure de faire face à la demande. Dans une telle situation, recourir au marché international n'avait rien d'anormal. Au contraire, fixer comme objectif de politique économique la production de matériels de protection en France ne permet pas de répondre à la deuxième question, autrement importante : ce n'est pas de décrochage industriel dont il s'agit mais de décrochage technologique. Ce décrochage-là, en cours et qui ne se règlera pas en relançant la production de masques en France, est illustré par les retards français dans la mise au point et la production de vaccins et plus généralement la vulnérabilité de son industrie pharmaceutique à la rupture technologique que constituent les bio-techs.

Qu'appelle-t-on désindustrialisation ? Faut-il réindustrialiser la France et si oui comment ? Telles sont les questions posées ici. Nous défendons l'idée que les solutions existent, à condition premièrement de ne pas se tromper d'objectif (et donc de bien définir ce que l'on appelle « industrie ») et deuxièmement de ne pas justifier le manque d'ambition des politiques françaises par la rigidité supposée du cadre européen.

¹ cf. Fontagné L., Lorenzi J.-H., Désindustrialisation, délocalisations. Rapport pour le Conseil d'Analyse économique, n° 55.

Les mécanismes du décrochage

Commençons par utiliser un critère simple, celui de la part de l'industrie dans la richesse nationale créée chaque année, c'est-à-dire la valeur ajoutée. Et ceci à dix ans d'intervalle, 2008 et 2018. Au Royaume-Uni cette part est très exactement de 10% aux deux dates. Le décrochage industriel y a été précoce mais s'est arrêté. L'Espagne passe de 13,8% à 12,4%, l'Italie de 17,1% à 16,7%, la France de 12,3 à 10,9%. En relatif, le décrochage de la France est donc comparable à celui de l'Espagne, mais bien supérieur à celui de l'Italie. Mais surtout, et cela est bien connu, l'Allemagne a mieux résisté augmentant de 0,4 point la part de son industrie dans la valeur ajoutée pour atteindre le double de la part française, tandis que certains pays de l'élargissement affirmaient leur avantage compétitif industriel, comme par exemple la République Tchèque désormais plus « industrielle » que l'Allemagne. Comparativement à l'Allemagne ou au Royaume-Uni, l'industrie française ne s'est donc jamais vraiment rétablie suite à la grande crise financière de 2008.

Si l'on adopte une perspective de plus long terme, les mécanismes à l'œuvre en France étaient communs à l'ensemble des pays avancés. L'enchaînement vertueux correspondait à toujours plus d'industrie en volume en France (une production doublée depuis 1970), avec toujours moins d'emploi (une division par deux des heures travaillées). La productivité augmentait, ce qui permettait de distribuer plus de revenus et de baisser les prix, mais la demande en valeur se déportant vers les services, la part dans la valeur ajoutée baissait (une division par deux sur la période considérée). L'équation était donc : produire plus avec moins de travail pour vendre moins cher. Cette dynamique s'est enrayée faute d'innovation.

La réalité de l'industrie

Mais au fond, de quoi parle-t-on exactement ? Selon l'INSEE, et tout institut statistique donne une définition équivalente, « relèvent de l'industrie les activités économiques qui combinent des facteurs de production (...) pour produire des biens matériels destinés au marché ».

Comme tout critère de classification, celui-ci pose problème lorsque la réalité sous-jacente évolue. La notion de bien « matériel » ne correspond plus à la réalité de la production industrielle : le smartphone dans votre poche n'est pas qu'un bien matériel. Il s'agit de l'association de différentes solutions techniques ayant une dimension immatérielle (les brevets), comme le stockage d'électricité, le traitement de l'information, internet, les écrans tactiles, ou la miniaturisation des antennes, avec un bouquet de services : ceux de votre opérateur, de votre banque, de votre compagnie aérienne préférée, le magasin d'applications, le service payant de streaming auquel vous êtes abonné.

C'est ainsi qu'un quart des entreprises manufacturières installées en France ne vendent que des services, qu'un tiers vendent majoritairement des services et les quatre cinquièmes vendent aussi des services². Non seulement donc l'industrie vend des services mais elle n'a pas forcément d'usines. S'il est de bon ton en France de brocarder le « Fables » de Serge Tchuruk justifiant il y a vingt ans le naufrage du groupe industriel dont il avait les commandes, cette réalité statistique a fait son chemin et a pu accompagner de grands succès industriels. Si le smartphone dans votre poche a été conçu en Californie, il en est une bonne illustration. Aux Etats-Unis, le concept statistique de « Factoryless Good Producers » a émergé pour regrouper les industriels classés dans les activités de service (comme le commerce de gros) et concevant

² cf. Fontagné L., Harrison A. (2017) eds., *The Factory Free Economy - Outsourcing, Servitization and the Future of Industry*. Oxford University Press, Mars.

des produits, prenant le risque économique afférent, contrôlant toute la chaîne de valeur et en assurant la distribution. Selon les estimations, il y aurait là un gisement d'environ un million d'emplois industriels enregistrés dans les services aux Etats-Unis.

Une autre façon de définir l'industrie consiste à en donner une analyse économique. L'industrie ne produit pas des biens matériels, elle produit de la valeur. Elle le fait en produisant à grande échelle et donc en réalisant des gains de productivité importants. Cela lui permet de déverser des revenus sur le reste de l'économie soutenant la demande et donc la création d'emploi dans d'autres activités. On l'aura compris, de ce point de vue les services sont aussi une industrie.

L'équation de la réussite est une idée, associée à une prise de risque économique, avec une mise de départ considérable et une grande série pour amortir ces coûts initiaux. Cette définition alternative de l'industrie est utile pour définir les contours d'une politique industrielle visant à lever les obstacles pouvant freiner le développement de nouvelles activités ; elle suggère un critère simple, celui de l'échec de marché. La main invisible du marché ne peut pas toujours à elle seule orienter les ressources vers ces activités nouvelles. Nous écrivions avec Jean-Hervé Lorenzi en 2004 à propos des biotechnologies qu'elles « constituent [l'un] des domaines d'activités particulièrement illustratifs du risque potentiel de perte de substance de l'industrie. (...) Même si les montants en jeu sont encore faibles par rapport à l'ensemble de l'économie américaine (...), il est fort probable que le schéma ayant abouti à la domination de l'industrie américaine des semi-conducteurs sur la période 1970-1985 se reproduise dans les biotechnologies. (...) Les caractéristiques de cette industrie sont typiquement celles où le système américain de financement cumule les avantages, jusqu'à attirer les entreprises pharmaceutiques européennes et les start-up qui y sont associées : les aides

publiques à la R&D, notamment dans le secteur de la santé, génèrent un effet de levier considérable ; les phases de démarrage disposent de capitaux abondants ; les phases de développement bénéficient du concours des fonds d'investissement spécialisés ; le marché boursier reste ouvert pour les entreprises de croissance. ». Le diagnostic que nous portons dix-sept ans plus tard sur la désindustrialisation française – un déficit d'innovation et de prise de risque -- était déjà établi. Que s'est-il passé dans l'intervalle ? Il est de bon ton à Paris de faire porter aux règles de Bruxelles la responsabilité d'un certain manque d'ambition industrielle. Mais Berlin où Londres étaient soumis aux mêmes règles. Et surtout, les règles ne sont plus un frein à l'ambition depuis...2014.

Les pistes de réindustrialisation

Les développements précédents suggèrent trois clarifications concernant la politique industrielle. Premièrement, l'industrie doit être comprise au sens de bouquets de biens et services : utiliser la puissance publique pour freiner la décroissance des industries à cheminée n'est pas une option. Deuxièmement, politique industrielle et politique de la concurrence peuvent partager le même objectif, celui de favoriser les entrées de nouveaux acteurs dans les secteurs d'avenir. Troisièmement, et c'est le point que nous souhaitons souligner pour conclure, le cadre européen n'est pas un obstacle.

La solution a un nom : les Projets importants d'intérêt européen commun (PIIEC) dont la première vague s'est étalée sur la période 2014-20. Les microprocesseurs en 2016 ou les batteries en septembre 2019 en ont bénéficié. L'idée de ce dispositif est de définir les critères de compatibilité entre Marché intérieur et aides d'État à partir de trois critères : i) défaillance de marché ; ii) dimension sociétale et stratégique pour l'Union européenne ; iii) absence d'effet d'aubaine³.

³ La Commission européenne a lancé en février 2021 une consultation concernant la révision de cet outil

En pratique, pour être admissible un projet doit relever d'un domaine d'intérêt pour l'Union comme l'énergie, le transport, l'innovation ou encore le numérique, doit regrouper plusieurs Etats membres, enfin doit avoir des retombées positives au-delà des pays participants au projet. Inutile de souligner que la liste des activités d'avenir relevant de ces critères est longue, activités dont certaines nous font déjà cruellement défaut. Le soutien appuyé de l'Allemagne à ce type d'approche pendant sa présidence de l'Union s'est illustré par le lancement d'un grand projet sur l'hydrogène aux fortes retombées potentielles pour l'industrie automobile européenne. La nouvelle Commission européenne fait également de cette stratégie l'une de ses priorités. Le projet d'hydrogène décarboné, ou celui des nanopuces électroniques de nouvelle génération, projets dans lesquels la France est impliquée, ont été lancés en 2020.

Les outils et la doctrine sont désormais disponibles. Quid de l'ambition ? Un PIIEC concernant l'innovation dans le domaine de la santé vient d'être lancé en mars 2021 ; il s'agit notamment de « d'innovations de rupture technologique destinées à réduire drastiquement les coûts de production et les temps de développement, notamment en matière de bio-production » ; et de technologies médicales applicables aux secteurs du « dispositif médical et diagnostic in vitro (intelligence artificielle, système de système, constitution de plateformes de partage de données etc.) ». Gageons que l'ambition est retrouvée.

Auteurs

François Barrault, président Idate DigiWorld

Véronique Bellon-Maurel, INRAE, chef Adjointe du Département MathNum, directrice de l'Institut Convergences Agriculture Numérique #DigitAg

Françoise Benhamou, co-présidente du Cercle des économistes et professeure à Sorbonne Paris Nord

Bernard Bigot, directeur général d'ITER Organization

Anne Bouverot, présidente de Technicolor et de la Fondation Abeona

Elie Cohen, directeur de recherches au CNRS et professeur à SciencesPo

Mathieu Duchâtel, directeur du programme Asie de l'Institut Montaigne

Lionel Fontagné, membre du Cercle des économistes et professeur à l'École d'Économie de Paris

André Loesekrug-Pietri, président & Scientific Director du Joint European Disruptive Initiative

Jean-Hervé Lorenzi, fondateur du Cercle des économistes

Denis Lucquin, Managing Partner chez Sofinnova Partners

Valérie Mignon, membre du Cercle des économistes, professeure d'économie à l'Université Paris Nanterre, chercheur à EconomiX-CNRS et conseiller scientifique au CEPII

Mathieu Noguès, assistant de recherche de la chaire « Transitions Démographiques, Transitions Économiques »

Tanya Perelmuter, directrice de la Stratégie et des Partenariats de la Fondation Abeona

Isabelle Piot-Lepetit, MolSA, INRAE, directrice adjointe Institut Convergences #DigitAg

Erwann Tison, directeur des études de l'Institut Sapiens

Alain Trannoy, membre du Cercle des économistes, directeur d'Études à l'EHESS et professeur à l'AMSE

Guy Turquet de Beauregard, président de SEVY Conseil et de Nuclear Medicine Europe

Claire Waysand, membre du Cercle des économistes et directrice générale adjointe - secrétaire générale d'ENGIE