

OCTOBRE
2021

Calcul stratégique

Le calcul haute performance
et l'informatique quantique
dans la quête de puissance
technologique de l'Europe

Alice PANNIER



L'Institut français des relations internationales (Ifri) est un centre de recherche et de débat, consacré à des questions majeures de politique et d'économie internationales. Présidé par Thierry de Montbrial depuis sa fondation en 1979, l'Ifri est une organisation non gouvernementale à but non lucratif.

Think tank indépendant, l'Ifri définit son propre agenda de recherche et publie régulièrement ses rapports pour un public international. Avec une approche interdisciplinaire, l'Ifri rassemble des décideurs politiques et économiques, des chercheurs et des spécialistes à la renommée internationale pour animer débats et activités de recherche.

Les opinions exprimées dans ce texte n'engagent que la responsabilité de l'auteur.

ISBN : 979-10-373-0448-3

© Tous droits réservés, Ifri, 2021

Couverture : Gauche : Machine IBM Q System One (© Boykov/Shutterstock.com) ;
Droite : Carte graphique (© Sdecoret/Shutterstock.com).

Traduit par ***Cadenza Academic Translations***.

Comment citer cette publication :

Alice Pannier, « Calcul stratégique : Le calcul haute performance et l'informatique quantique dans la quête de puissance technologique de l'Europe », *Études de l'Ifri*, Ifri, octobre 2021.

Ifri

27 rue de la Procession 75740 Paris Cedex 15 – FRANCE

Tel. : +33 (0)1 40 61 60 00 – Fax : +33 (0)1 40 61 60 60

E-mail : accueil@ifri.org

Site internet : ifri.org

Auteur

Alice Pannier est chercheuse et responsable du programme Géopolitique des technologies, lancé à l'Ifri en octobre 2020, après avoir été chercheuse associée depuis 2019. Elle a récemment publié « The Changing Landscape of European Cloud Computing: Gaia-X, the French National Strategy, and EU Plans » (*Briefings de l'Ifri*, 22 juillet 2021) et « Europe in the Geopolitics of Technology: Connecting the Internal and External Dimensions » (*Briefings de l'Ifri*, 9 avril 2021).

Avant de rejoindre l'Ifri, elle a été professeure assistante en relations internationales et études européennes à la Paul H. Nitze School of Advanced International Studies (SAIS) de l'université Johns Hopkins à Washington (2017-2020). Diplômée du King's College de Londres et de l'université Paris-I Panthéon-Sorbonne, elle est titulaire d'un doctorat de l'IEP de Paris.

Résumé

La puissance de calcul joue un rôle clé dans l'analyse de données et l'apprentissage automatique, dans la cybersécurité, la recherche scientifique et certains domaines militaires, comme la conception d'ogives et la simulation d'explosions nucléaires. L'informatique a des implications industrielles, notamment en raison d'un nombre relativement réduit d'acteurs qui détiennent des positions clés dans la chaîne de valeur. Cette étude se concentre sur deux segments complémentaires de l'informatique : le calcul haute performance (HPC, ou « supercalcul ») et l'informatique quantique.

Le HPC est utilisé depuis plusieurs décennies dans la recherche scientifique, la météorologie et la défense, et les États continuent de générer les besoins en ordinateurs massifs. Le domaine observe néanmoins une diversification de ses usages, en raison de nouveaux besoins engendrés par les applications industrielles du *big data*. Quant à l'informatique quantique, elle en est encore au stade expérimental, mais son potentiel de rupture est considérable car elle promet de multiplier la puissance de calcul de manière exponentielle. Les technologies de l'information quantique ont connu un progrès rapide ces dernières années, même si les ordinateurs quantiques à grande échelle n'apparaîtront sans doute que d'ici une décennie.

La course à la puissance de calcul, dont le calcul quantique, est devenue un élément clé de la compétition technologique entre les États-Unis et la Chine, mais c'est aussi une priorité stratégique pour l'Europe. Au-delà des stratégies nationales, les pays européens cherchent à mettre en commun leurs ressources, l'Union européenne (UE) encourageant le développement de services informatiques partagés, d'infrastructures de données et d'une industrie locale.

L'Europe est confrontée à de nombreux défis, comme l'approvisionnement en puces électroniques et la consommation énergétique, ainsi qu'à de nombreux risques, comme les restrictions d'exportation et les rachats d'entreprises. En outre, les choix d'approvisionnement public mettent en évidence l'existence de débats et contradictions internes relatifs au développement de la puissance technologique européenne, puisque la frontière entre recherche scientifique et avantage stratégique devient floue. L'Europe se heurte aussi à un problème bien connu de manque d'investissement privé dans les technologies de rupture. Toutefois, les

technologies quantiques offrent aujourd'hui l'occasion de tirer des enseignements des développements passés en informatique classique et de prendre les bonnes décisions dès le départ.

Sommaire

INTRODUCTION	6
LE CALCUL HAUTE PERFORMANCE	9
Les évolutions du calcul haute performance	9
<i>La répartition mondiale de la puissance de calcul</i>	<i>11</i>
<i>Prochaine étape : la machine exaflopique.....</i>	<i>16</i>
<i>La « démocratisation » du calcul haute performance.....</i>	<i>17</i>
Supercalculateurs européens : vers un rattrapage ?	20
<i>Les limites de la puissance de calcul européenne</i>	<i>20</i>
<i>Le projet d'entreprise commune EuroHPC</i>	<i>23</i>
<i>L'avenir des supercalculateurs européens : efficacité énergétique et souveraineté technologique ?</i>	<i>25</i>
L'INFORMATIQUE QUANTIQUE	28
Une révolution dans l'informatique	28
<i>Vers des ordinateurs quantiques :</i>	
<i>progrès et défis technologiques</i>	<i>29</i>
<i>Applications et implications de l'informatique quantique</i>	<i>34</i>
L'Europe dans la course à l'ordinateur quantique.....	37
<i>La concurrence sino-américaine et les technologies quantiques ..</i>	<i>37</i>
<i>Europe : un écosystème quantique en croissance</i>	<i>41</i>
Des questions en suspens pour l'Europe	46
<i>Collaborations internationales : quand la science devient technologie stratégique.....</i>	<i>46</i>
<i>La course mondiale aux capitaux</i>	<i>47</i>
CONCLUSION	50

Introduction

La puissance de calcul joue un rôle essentiel dans l'analyse de données et l'apprentissage automatique, dans la cybersécurité, la recherche scientifique et des domaines militaires comme la conception d'ogives nucléaires et la simulation d'explosion. L'informatique a également des implications industrielles, notamment en raison d'un nombre relativement réduit d'acteurs qui détiennent des positions clés dans la chaîne de valeur. De ce fait, certains considèrent que les contours de la puissance informatique définissent qui détient le contrôle et l'accès aux avantages des technologies de l'informatique comme l'intelligence artificielle¹.

Cette étude se concentre sur deux segments complémentaires de l'informatique : le calcul haute performance (HPC, ou « supercalcul ») et l'informatique quantique. Ces deux domaines présentent des stades de maturité très différents. Le HPC est largement utilisé dans la recherche scientifique, la météorologie, la défense, la finance et l'industrie depuis les années 1990. La capacité d'un État à utiliser des supercalculateurs constitue une forme de *soft power*, ainsi qu'un impératif de recherche scientifique et de sécurité nationale. Aujourd'hui, quelques pays dans le monde sont engagés dans une course pour déployer la nouvelle génération de supercalculateurs, les machines exaflopiques. Le domaine observe actuellement une diversification de ses usages, en raison des nouveaux besoins engendrés par les applications industrielles du *big data*.

Encore en phase expérimentale, l'informatique quantique présente quant à elle un fort potentiel de rupture, à la fois dans les domaines civil et militaire. Elle vise à exploiter les propriétés de la mécanique quantique et constitue donc un tout nouveau paradigme dans l'informatique. L'informatique quantique va en effet multiplier de manière exponentielle la puissance de calcul et cela aura des implications significatives en cybersécurité et des applications industrielles et scientifiques. Ce domaine a connu un progrès rapide ces dernières années, même si les ordinateurs quantiques à grande échelle n'apparaîtront sans doute que d'ici une décennie.

1. T. Hwang, « Computational Power and the Social Impact of Artificial Intelligence », Document de travail, 2018, p. 7, disponible sur : <https://papers.ssrn.com> ; M. C. Horowitz, « AI and the Diffusion of Global Power », Centre for International Governance Innovation, 16 novembre 2020, disponible sur : www.cigionline.org.

La course à la puissance de calcul, notamment à l'informatique quantique, est devenue un élément essentiel de la compétition technologique entre les États-Unis et la Chine, mais elle est loin d'être une affaire exclusivement sino-américaine. Que ce soit pour ses applications ou ses implications, la puissance de calcul est une priorité stratégique pour l'Union européenne (UE) comme pour ses États membres. C'est d'autant plus vrai concernant l'informatique quantique. Dans plusieurs pays, la science quantique est passée de domaine de recherche universitaire à secteur technologique en forte croissance². Ces pays développent donc des stratégies dans ce domaine, créant une dynamique comparable à celle de la conquête spatiale.

Cette étude examine l'état d'avancement de l'évolution technologique et de la compétition internationale en HPC et en informatique quantique, en se concentrant notamment sur la position de la France et de l'Europe dans la course mondiale à la puissance de calcul. La première partie présente l'évolution actuelle du secteur HPC : d'une part, le rôle durable joué par les États dans la définition des supercalculateurs comme secteur stratégique, et d'autre part, la « démocratisation » actuelle de ce domaine, avec des utilisations de plus en plus nombreuses dans l'industrie. Cette partie aborde ensuite les considérations politiques soulevées par le supercalcul pour l'Europe, ainsi que les stratégies actuelles visant à accroître la puissance technologique européenne dans ce domaine.

La seconde partie aborde l'informatique quantique. Après en avoir introduit les principes fondamentaux, elle passe en revue les progrès récents et les derniers obstacles technologiques, ainsi que les applications stratégiques et économiques de l'informatique quantique. Elle examine ensuite les stratégies quantiques déployées par les États-Unis, la Chine et les pays européens, en insistant notamment sur le Plan quantique 2021 de la France.

Ce rapport montre que le HPC et l'informatique quantique présentent à la fois des défis et des opportunités pour les pays européens, qui cherchent à profiter des possibilités de la puissance de calcul pour l'économie des données et la sécurité nationale, ainsi que pour résoudre des problèmes de société critiques dans les domaines de la santé et du changement climatique³. Au-delà des stratégies et investissements nationaux dans les technologies HPC et quantiques, des efforts collectifs sont déployés en Europe pour centraliser les

2. G. Brennen *et al.*, « An Australian Strategy for the Quantum Revolution », *op. cit.*, p. 10.

3. M. Heitor, ministre portugais des Sciences, des Technologies et de l'Enseignement supérieur, cité par le Conseil de l'UE, « Calcul à haute performance : accord au sein du Conseil sur le financement de l'UE », Communiqué de presse, 28 mai 2021, disponible sur : www.consilium.europa.eu.

ressources. L'UE s'efforce en effet de développer des services informatiques et une infrastructure de données fédérés, et d'assurer des chaînes d'approvisionnement en composants, technologies et connaissances, notamment pour limiter les risques de rupture.

Les technologies informatiques présentent des défis pour l'Europe, comme l'approvisionnement en puces électroniques et la consommation énergétique, ainsi que des risques, comme les restrictions d'exportation et les rachats d'entreprises. En outre, pour le HPC comme pour l'informatique quantique, les choix d'approvisionnement précipitent l'Europe dans des débats et contradictions internes relatifs au développement de la puissance technologique européenne, à mesure que la frontière entre recherche scientifique et avantage stratégique devient floue. L'Europe se heurte aussi à un problème bien connu de manque d'investissement privé dans les technologies de rupture. Or, les technologies quantiques offrent aujourd'hui l'occasion de tirer des enseignements des développements passés en informatique classique et de prendre les bonnes décisions dès le départ. En cas d'échec, l'Europe connaîtra non seulement de sérieuses répercussions sur son économie mais aussi sur sa sécurité.

Le calcul haute performance

Le calcul haute performance (HPC) désigne des systèmes informatiques souvent appelés « supercalculateurs », dotés d'une puissance de calcul extrêmement élevée, capables de résoudre des problèmes très complexes très rapidement⁴. Le développement des supercalculateurs a été et reste largement porté par les États, compte tenu du coût élevé de leur acquisition et exploitation et de leur utilisation pour la sécurité nationale (par exemple, en simulation nucléaire), la recherche médicale et la modélisation climatique. L'essor de l'économie du *big data* et de la puissance de calcul requise pour entraîner les algorithmes de l'intelligence artificielle (IA) et pour effectuer des simulations, ainsi que la croissance du *cloud computing*, a « démocratisé » le recours au calcul haute performance dans l'industrie. Aujourd'hui, les entreprises américaines d'ordinateurs et de processeurs dominent le marché européen, tandis que la Chine a développé une technologie locale. L'Europe cherche à rattraper son retard en soutenant son tissu industriel et sa technologie de processeurs, mais elle se heurte à des difficultés internes d'ordre industriel, technologique et politique.

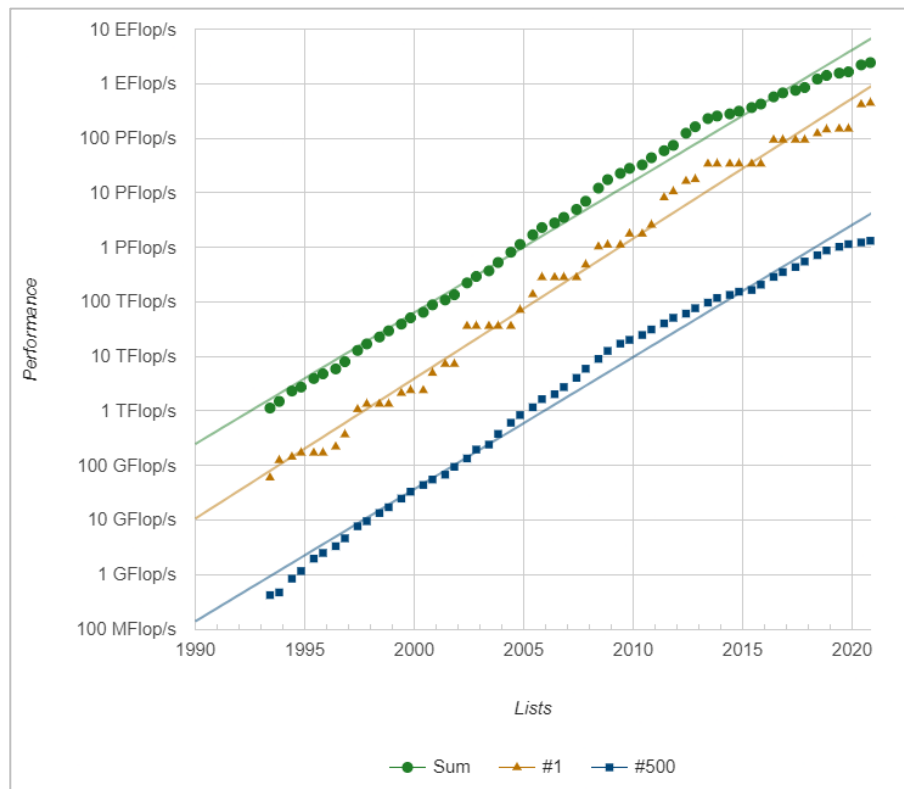
Les évolutions du calcul haute performance

Le concept actuel d'ordinateurs à haute performance est apparu à la fin des années 1980 et au début des années 1990, avec l'avènement du traitement massivement parallèle, permettant de construire des supercalculateurs avec des centaines de milliers de cœurs de traitement. Le graphique sur la page suivante montre le rythme de croissance de la puissance de calcul depuis les années 1990. La puissance de calcul est mesurée dans le jargon HPC en opérations en virgule flottante par seconde (*floating point operations per second*, ou flops). Auparavant mesurée en gigaflops – c'est-à-dire un milliard (10^9) d'opérations par seconde –, on utilise désormais les pétaflops (10^{15} opérations par seconde), et bientôt – sans doute d'ici fin 2021 – les exaflops : 10^{18} ou un quintillion (un milliard de milliards) d'opérations

4. Conseil de l'UE, « Calcul à haute performance : accord au sein du Conseil sur le financement de l'UE », *op. cit.*

par seconde. Pour donner un ordre de grandeur, un supercalculateur pétaflopique est un million de fois plus puissant qu'un ordinateur portable haut de gamme⁵.

Évolution de la performance des supercalculateurs



Source : Top500

Légende : Performance = Performance ; Lists = Listes ; Sum = Somme.

Les gouvernements ont joué un rôle important dans l'histoire du développement et de l'essor de la technologie informatique, notamment de la technologie HPC⁶ – même si, ces dernières décennies, l'évolution des puces électroniques a largement été favorisée par le secteur privé, en particulier l'industrie du smartphone. Le secteur public est toujours le principal consommateur de puissance de calcul concentrée. En 2018, plus de 90 % du temps d'exploitation du HPC revenait aux universités et aux centres de recherche académiques, tandis que les 10 % restants servaient à des fins commerciales ou à des utilisateurs finaux⁷. Les États ont principalement recours à la puissance de calcul pour la sécurité

5. R. Verger, « Meet the New Fastest Supercomputer in the World », *Popular Science*, 13 juin 2018, disponible sur : www.popsci.com.

6. Voir G. J. McLoughlin et I. F. Fergusson, « High-Performance Computers and Export Control Policy: Issues for Congress », Congressional Research Service, Rapport, 5 mai 2005.

7. B.-S. Gigler *et al.*, « Financing the Future of Supercomputing », Banque européenne d'investissement, Rapport, 2018, p. 35.

nationale : les supercalculateurs peuvent être utilisés pour concevoir, développer, fabriquer et tester des armes (dont des armes nucléaires) et des plateformes d'armement ; pour collecter, traiter, analyser et diffuser le renseignement ; pour la cryptographie ; pour la simulation de combat ; pour la défense antimissile, etc. Les supercalculateurs sont aussi utilisés pour les prévisions météorologiques et la recherche scientifique, dont médicale. La pandémie de Covid-19 aurait généré de nouveaux besoins en applications biomédicales, dans la mise au point de nouveaux médicaments et la création de jumeaux numériques humains⁸ (voir ci-dessous).

Puisque les supercalculateurs ont des usages duaux, ils sont soumis à des restrictions d'exportation depuis les années 1990⁹. Aujourd'hui, la concurrence entre les États-Unis et la Chine se joue clairement dans le domaine du HPC, en raison d'inquiétudes concernant à la fois la propriété intellectuelle et les applications potentielles de la technologie de puces américaine. En avril 2021, l'administration Biden a ajouté plusieurs organismes chinois dédiés au calcul intensif à la « liste d'entités », dont le Centre national de supercalculateurs (qui réalise des simulations de véhicules hypersoniques), empêchant l'exportation de la technologie américaine vers ces entités¹⁰.

La répartition mondiale de la puissance de calcul

Un nombre réduit de pays à travers le monde possède des capacités significatives de supercalcul. La Chine et les États-Unis mènent la course, suivis par des puissances HPC de second rang : le Japon, l'Allemagne, la France, les Pays-Bas, l'Irlande, le Royaume-Uni et le Canada (voir Tableau 1).

En ce qui concerne les entreprises du secteur HPC, les principaux fournisseurs sont Lenovo (Chine, premier fournisseur au monde, avec 36,8 % du marché), Inspur (Chine, 11,6 %), Hewlett Packard Enterprise (HPE, États-Unis, 9 %), Sugon (Chine, 7,8 %) et Atos (France, 7,2 %). Avec l'acquisition de Cray en 2019, qui détient 6,4 %

8. S. Van Dorpe, « Supercomputer Scrap Shows EU's Digital Dilemma », *Politico*, 10 juin 2021.

9. Voir G. J. McLoughlin et I. F. Fergusson, « High Performance Computers and Export Control Policy », *op. cit.*, pour un aperçu du développement du contrôle des exportations HPC dans les années 1990 et au début des années 2000. Pour un exposé sur la période de la guerre froide, voir F. Cain, « Computers and the Cold War: United States Restrictions on the Export of Computers to the Soviet Union and Communist China », *Journal of Contemporary History*, vol. 40, n° 1, 2005, p. 131-147.

10. E. Nakashima et G. Smith, « China Builds Advanced Weapons Systems Using American Chip Technology », *Washington Post*, 10 avril 2021.

du marché, HPE se place à présent en deuxième position, avec 17,4 % du marché. La situation est toutefois différente si l'on regarde la puissance de traitement plutôt que la part de marché détenue¹¹. La première place revient alors à Fujitsu (Japon, 19,8 %). Inauguré en juin 2021, le *Fugaku* est la machine la plus puissante du monde. Elle est trois fois plus puissante que la deuxième machine la plus puissante. Sa puissance de calcul équivaut à celle de 20 millions de smartphones¹² et se situe à mi-chemin de la machine exaflopique (voir Tableau 2).

Tableau 1 : Répartition des supercalculateurs par pays dans le Top500

	Pays	Nombre	Part du système (%)
1	Chine	188	37,6
2	États-Unis	122	24,4
3	Japon	34	6,8
4	Allemagne	23	4,6
5	France	16	3,2
6	Pays-Bas	16	3,2
7	Irlande	14	2,8
8	Royaume-Uni	11	2,2
9	Canada	11	2,2
10	Italie	6	1,2
11	Brésil	6	1,2
12	Arabie Saoudite	6	1,2
13	Corée du Sud	5	1
14	Pologne	4	0,8
15	Singapour	4	0,8

Source : Top500, juin 2021.

Comme on peut le voir sur le Tableau 2 ci-après, les institutions du secteur public – administrations publiques ou laboratoires de recherche universitaire – possèdent les machines les plus puissantes. Nvidia et Eni (la société italienne de pétrole et de gaz) sont deux exceptions dans le top 10. Après les dix premiers, apparaissent aussi de grandes entreprises numériques, et surtout des fournisseurs de services *cloud*, tels que Microsoft Azure et Amazon Web Services, qui

11. Le Top500 est un point de repère plus qu'une indication précise de la performance des ordinateurs, puisque leur évaluation ne s'appuie pas sur des applications pratiques.

12. S. Matsuoka, Directeur du Centre de science informatique RIKEN, au Forum Teratec 2021, le 22 juin 2021, vidéo disponible sur : <https://teratec.eu>.

ont acquis des ressources informatiques considérables¹³. Les agences de prévision météorologique comptent aussi parmi les plus gros utilisateurs HPC de la planète.

La performance d'un supercalculateur pour une tâche donnée ne dépend pas seulement du nombre de cœurs de la machine et de la vitesse de son réseau interconnecté, mais aussi du type et de l'architecture de ses puces¹⁴. L'un des problèmes du HPC est que la performance a tendance à se faire au détriment de l'adaptabilité : le matériel informatique construit à des fins précises est plus rapide que les ordinateurs universels. Ainsi, beaucoup de pays (les États-Unis, le Canada, le Japon, le Royaume-Uni, l'Allemagne ou la France) ont récemment acquis de grands instruments de calcul dédiés à l'IA pour les milieux de la recherche. Parmi eux, le Centre RIKEN au Japon, qui a mis au point le *Fugaku* ; le Joint Academic Data Science Endeavour (JADE) au Royaume-Uni en 2018 ; ou le GENCI (Grand équipement national de calcul intensif) en France, qui a inauguré une nouvelle machine pour la recherche en IA (le *Jean Zay*) en 2020.

Il est donc essentiel de prendre en compte les processeurs qui activent les machines HPC et le rôle central que les fabricants de puces (dont AMD, Intel et Nvidia¹⁵) jouent dans le façonnement et la construction du domaine de la puissance de calcul. Le paysage international des processeurs a énormément évolué ces dernières années avec la percée de Nvidia, une entreprise californienne créée en 1997¹⁶. Les ordinateurs fonctionnent grâce à des processeurs (CPU) et de plus en plus grâce à des processeurs graphiques (GPU), qui rendent possible la vision par ordinateur (comme la 3D, la vidéo, la vision artificielle et la reconnaissance d'image)¹⁷. Nvidia conçoit des GPU, à l'origine pour l'industrie du jeu, et aujourd'hui pour des supercalculateurs dans le monde entier (voir Tableau 2).

13. Il y a une légère différence entre un supercalculateur et des réseaux de serveurs. L'Elastic Computer Cloud (EC2) d'Amazon est un réseau de serveurs à accès internet qui fournit une puissance de calcul à la demande, plutôt qu'un groupe autonome doté de sa propre interconnexion locale.

14. T. Hwang, « Computational Power and the Social Impact of Artificial Intelligence », *op. cit.*, p. 8.

15. Ce sont les principaux producteurs de processeurs utilisés en HPC. On notera cependant que AMD et Nvidia sont des entreprises « sans usine » (« *fabless* ») qui conçoivent les puces mais confient leur fabrication à des entreprises industrielles, comme TSMC ; tandis que Intel se charge à la fois de la conception et de la fabrication.

16. Entretien avec Olivier Ezratty, consultant indépendant, 6 avril 2021.

17. Les GPU distribuent à un grand nombre de cœurs des tâches de calcul qui doivent être traitées en parallèle, contrairement aux processeurs qui contiennent un plus petit nombre de cœurs plus puissants, capables de ne gérer qu'un nombre limité de tâches simultanément. Voir T. Hwang, « Computational Power and the Social Impact of Artificial Intelligence », *op. cit.*, p. 10.

Les GPU ont en effet considérablement augmenté la puissance de calcul pour certaines applications, comme l'apprentissage automatique. Il s'agit donc d'une véritable révolution en HPC. En 2017, Nvidia a inauguré un GPU fondé sur une nouvelle architecture (« Volta »), conçu pour l'IA et notamment les voitures autonomes, qui équipe désormais les deux plus puissants supercalculateurs des États-Unis, *Sierra* et *Summit*. L'entreprise a aussi commencé à fabriquer ses propres supercalculateurs. Nvidia espère désormais acquérir ARM, un concepteur britannique de puces de premier plan, racheté 24,3 milliards de livres (29 milliards d'euros) par le fonds d'investissement japonais SoftBank en 2016. Depuis septembre 2021, cette initiative est examinée par le gouvernement britannique qui craint des pratiques anticoncurrentielles et risques pour la sécurité nationale, dans un contexte de concurrence géopolitique accrue autour des puces électroniques¹⁸.

18. K. Donaldson et G. Turner, « U.K. Considers Blocking Nvidia Takeover of Arm Over Security », Bloomberg, 3 août 2021, disponible sur : www.bloomberg.com. L'architecture ARM pour les processeurs est aujourd'hui l'ensemble de normes le plus utilisé au monde.

**Tableau 2 : Les supercalculateurs les plus puissants
dans le monde**

	Pays d'implantation	Fabricant	Processeur	Nom	Site	Performance¹⁹
1	Japon	Fujitsu	Fujitsu/ARM	<i>Fugaku</i>	Centre de science informatique RIKEN	442 010
2	États-Unis	IBM	IBM/Nvidia	<i>Summit</i>	Département de l'Énergie (DOE) / Laboratoire national d'Oak Ridge	148 600
3	États-Unis	IBM/Nvidia/Mellanox	Nvidia	<i>Sierra</i>	DOE / Laboratoire national Lawrence Livermore	94 640
4	Chine	NRCPC ²⁰	Sunway	<i>Sunway TaihuLight</i>	Centre national de supercalculateurs Wuxi	93 014
5	États-Unis	HPE Cray	AMD/Nvidia	<i>Perlmutter</i>	DOE / National Energy Research Scientific Computing Center	64 590
6	États-Unis	Nvidia	AMD/Nvidia	<i>Selene</i>	Nvidia Corporation	63 460
7	Chine	National University of Defense Technology	Intel	<i>Tianhe-2A</i>	Centre national de supercalculateurs de Guangzhou	61 444
8	Allemagne	Atos	AMD/Nvidia	<i>Juwels Booster Module</i>	Centre de recherche de Jülich	44 120
9	Italie	Dell	Nvidia	<i>HPC5</i>	Eni S.p.A.	35 450
10	États-Unis	Dell	Intel	<i>Frontera</i>	Université du Texas	23 516

Source : Top500, juin 2021.

19. Performance Linpack en teraflops.

20. NRCPR : National Research Center of Parallel Computer Engineering & Technology.

Prochaine étape : la machine exaflopique

Actuellement, l'univers du HPC est caractérisé par une course au développement d'ordinateurs exaflopiques. Ces ordinateurs seront capables de traiter un milliard de milliards (un trillion) d'opérations par seconde²¹. Autrement dit, les machines exaflopiques seront deux fois plus puissantes que la machine la plus puissante qui existe aujourd'hui et vingt fois plus puissante que la machine européenne la plus puissante²². Les machines exaflopiques changeront la donne dans des domaines spécifiques de la simulation et de la visualisation 3D, utilisés en recherche nucléaire (par exemple, les ogives nucléaires de dernière génération), en sciences climatiques (les prévisions des conséquences de changements de température), en météorologie et océanographie haute résolution, ainsi qu'en recherche biologique et médicale (physiologie cardiaque). Le classement d'un pays au rang de puissance informatique mondiale est aussi l'expression de sa souveraineté nationale et de son *soft power*, comme l'a suggéré Emmanuel Jeannot de l'Inria²³.

Aucune machine exaflopique n'est encore utilisée²⁴, mais des programmes gouvernementaux sont en cours aux États-Unis, en Europe, en Chine et au Japon. Mettre au point des machines exaflopiques coûte de l'argent et nécessite des moyens technologiques. Ce dernier point notamment est un frein pour la Chine, en raison des restrictions d'exportation de la technologie américaine. Quant au coût, le financement de la R&D pour le *Fugaku* s'est élevé à environ 1 milliard d'euros sur dix ans²⁵.

La Chine et les États-Unis prévoient d'avoir leur propre machine exaflopique opérationnelle respectivement fin 2021 et en 2022. En juillet 2015, l'ancien président américain, Barack Obama, lançait la National Strategic Computing Initiative, appelant pour la première fois au développement accéléré d'un système informatique exaflopique qui intègre matériel et logiciel en vue d'un ensemble

21. E. Jeannot, cité dans « Calcul haute performance : Inria impliqué dans huit projets européens », Actualités Inria, 27 mai 2021, disponible sur : www.inria.fr.

22. *Ibid.*

23. Entretien avec Emmanuel Jeannot, Délégué scientifique d'Inria Bordeaux – Sud-Ouest, 28 juillet 2021.

24. Le *Fugaku* japonais a atteint une performance exaflopique d'après une référence alternative (Top500, « November 2020 », non daté, disponible sur : www.top500.org). En outre, le projet *fold@home*, qui connecte des milliers d'ordinateurs personnels qui prêtent leur puissance de traitement libre, reliés par internet, a déjà atteint une puissance de calcul d'un exaflop.

25. Entretien avec Jacques-Charles Lafoucrière, Chef de projet informatique, CEA, 26 juillet 2021.

d'applications répondant aux besoins gouvernementaux²⁶. HPE Cray prévoit de fournir son premier ordinateur exaflopique, *Frontier*, au laboratoire national d'Oak Ridge (ORNL, rattaché au Département de l'Énergie) fin 2021, pour une machine entièrement opérationnelle en 2022. L'ORNL dispose déjà de *Summit*, classée comme machine la plus puissante au monde en 2018-2020. La Chine, qui ne disposait d'aucun supercalculateur en 2001, a supplanté les États-Unis en termes de performance et de nombre de supercalculateurs en se plaçant à la tête du classement mondial en 2016²⁷. Aujourd'hui, la Chine possède toujours le plus grand nombre de supercalculateurs dans le Top500, mais ses machines sont dans l'ensemble moins performantes que celles des États-Unis. La Chine espère disposer de sa première machine opérationnelle, mettant en œuvre une technologie chinoise, d'ici fin 2021 et pourrait ainsi devenir le premier pays à être doté d'un ordinateur exaflopique²⁸. Pékin a aussi intégré la création de dix centres nationaux d'informatique exaflopique à son 14^e plan quinquennal pour le développement 2021-2025. D'autres pays dans le monde cherchent à construire des machines exaflopiques, mais sont moins avancés que la Chine, les États-Unis ou le Japon. C'est le cas de la Corée du Sud, qui prévoit d'inaugurer un ordinateur exaflopique national, construit avec des processeurs coréens, d'ici 2030²⁹. L'Europe, quant à elle, cherche à déployer des machines exaflopiques d'ici 2022-2023, comme détaillé ci-dessous.

La « démocratisation » du calcul haute performance

Compte tenu de son coût et de ses utilisations, le HPC ne constituait pas un besoin fonctionnel critique pour de nombreuses entreprises avant l'émergence de l'économie du *big data*. Aujourd'hui, les fonctions de la puissance de calcul ont changé, et le HPC se « démocratise³⁰ », puisqu'il joue un rôle important dans le développement de l'économie du *big data*³¹. Avec la prolifération des données, il existe en effet une demande croissante pour tirer de la

26. Maison-Blanche, « Executive Order – Creating a National Strategic Computing Initiative », 29 juillet 2015, disponible sur : <https://obamawhitehouse.archives.gov>.

27. B.-S. Gigler *et al.*, « Financing the Future of Supercomputing », *op. cit.*, p. 18 et p. 41.

28. T. P. Morgan, « A First Peek at China's Sunway Exascale Supercomputer », *The Next Platform*, 10 février 2021, disponible sur : www.nextplatform.com.

29. B. Garé, « La Corée du Sud en route vers le HPC exascale », *L'Informaticien*, 28 mai 2021, disponible sur : <https://linformaticien.com>.

30. Nvidia, « Accelerated Computing and the Democratization of Supercomputing », *Technical Overview*, 2018, disponible sur : www.nvidia.com.

31. Conseil de l'UE, « Calcul à haute performance : accord au sein du Conseil sur le financement de l'UE », *op. cit.*

valeur de celles-ci et les analyser presque en temps réel³². Le HPC est notamment intéressant pour les technologies d'IA, comme l'apprentissage profond. Ces technologies nécessitent une énorme puissance de calcul, à tel point que celle requise pour entraîner les programmes d'IA double tous les 3,4 mois³³.

Les analyses et la simulation de *big data* rendues possibles par le HPC présentent de nombreuses utilisations dans l'industrie, dans tous les procédés de conception et de fabrication : le jumelage numérique³⁴, la conception sur-mesure, la gestion d'opérations, la maintenance, l'optimisation ou l'évaluation. Au lieu de développer des prototypes physiques coûteux – ainsi que les outils et machines sur-mesure requis pour construire de tels prototypes, sans oublier les longues phases de test – les procédés sont transférés dans un environnement numérique, ce qui réduit les coûts de développement et le délai de commercialisation³⁵. La simulation HPC est aussi pertinente pour la simulation 3D de dynamique des fluides, la simulation de conduite des véhicules autonomes, la simulation de réservoirs dans l'industrie du pétrole et du gaz, l'optimisation des risques de portefeuille en finance, les scénarios de gestion de crises (par exemple, les feux de forêt), etc.

En dehors de l'industrie, l'utilisation croissante du HPC et du jumelage numérique continue d'être poussée par la recherche, notamment la recherche médicale et les sciences climatiques. Là aussi, les besoins en puissance de calcul dans la science ne cessent de croître³⁶. À titre d'illustration, depuis 2020, le Japon utilise son *Fugaku* pour simuler la propagation du Covid-19³⁷. À l'avenir, le jumelage numérique du corps humain, fondé sur l'ADN d'individus, permettra en théorie d'adapter les traitements médicaux à la physiologie et aux besoins d'une personne³⁸. En ce qui concerne le climat, l'UE a lancé le projet « Destination Earth » (DestinE) en 2021,

32. S. Gibson, « High-Performance Computing Use Cases and Benefits in Business », Tech Target, 5 avril 2019, disponible sur : www.searchcio.techtarget.com.

33. C. Deluzarche, « La puissance de calcul nécessaire pour entraîner l'IA double tous les 3,4 mois », Futura Tech, 14 novembre 2019, disponible sur : www.futura-sciences.com. Grâce à l'amélioration du matériel, les temps de formation pour un algorithme donné pourraient passer de quelques semaines à quelques heures ou minutes. Voir M. Horowitz, « Strategic Competition in an Era of Artificial Intelligence », CNAS, Rapport, 25 juillet 2018.

34. Un jumeau numérique est un modèle virtuel censé représenter un objet physique avec précision, mis à jour avec des données réelles, à des fins de simulations et de surveillance.

35. B.-S. Gigler *et al.*, « Financing the Future of Supercomputing », *op. cit.*, p. 37.

36. Entretien avec Jacques-Charles Lafoucrière, Chef de projet informatique, CEA, 26 juillet 2021.

37. « Japanese Supercomputer, Crowned World's Fastest, Is Fighting Coronavirus », BBC, 23 juin 2020, disponible sur : www.bbc.com.

38. Commission européenne, « Advanced Computing », dernière modification le 9 juillet 2021, disponible sur : www.digital-strategy.ec.europa.eu.

dans le cadre du Pacte vert³⁹. Le projet est de créer des jumeaux numériques de la Terre pour simuler les effets du changement climatique, grâce à un modèle numérique de haute précision de la Terre pour surveiller et simuler l'activité naturelle et humaine. Le projet s'étendra de 2021 à 2030. D'ici 2025, il inclura une plateforme *cloud* avec quatre ou cinq jumeaux numériques opérationnels.

En raison de la généralisation de ses utilisations, le marché du HPC s'est dynamisé : le taux de croissance du nombre d'entreprises a été estimé à 9,8 % entre 2017 et 2022⁴⁰. Le chiffre d'affaires mondial du marché a atteint 41 milliards de dollars (35 milliards d'euros⁴¹) en 2020 et devrait atteindre 66,5 milliards de dollars (56,7 milliards d'euros) en 2028⁴². Autrefois domaine exclusif du gouvernement, de la recherche et des grandes entreprises, le HPC évolue aujourd'hui pour prendre une place plus centrale dans l'ensemble de l'économie.

Outre la demande croissante, l'essor du secteur HPC est alimenté par des coûts de moins en moins élevés et une meilleure accessibilité du matériel, ainsi que le passage (partiel) du HPC « sur site » au *cloud*, ce qui permet aux utilisateurs d'accéder au traitement de données à haut débit depuis des services commerciaux comme Amazon Web Services⁴³. Un rapport suggère que le marché du HPC « sur site », d'une valeur de 24 milliards de dollars (20,5 milliards d'euros) en 2020, va croître de 7 % par an d'ici 2024, tandis que le marché du HPC dans le *cloud*, qui ne valait que 4,3 milliards de dollars (3,7 milliards d'euros) en 2020, va croître de 17 % par an jusqu'en 2024⁴⁴. Pour donner une idée de ces tendances, TSMC, le leader mondial en puces électroniques installé à Taïwan, estime que, grâce à « une demande sans précédent en puissance de calcul des centres de données dans le *cloud* et des infrastructures de communication⁴⁵ », « le principal moteur de sa croissance dans les prochaines années [sera] le calcul haute performance, dépassant son

39. Commission européenne, « Destination Earth », dernière modification le 8 juillet 2021, disponible sur : www.digital-strategy.ec.europa.eu.

40. S. Gibson, « High-Performance Computing Use Cases », *op. cit.*

41. Dans toute l'étude, les montants en euros utilisent les taux de conversion d'août 2021.

42. Emergen Research, « High-Performance Computing Market Size to Reach USD 66.46 Billion in 2028 », 19 avril 2021, disponible sur : www.globenewswire.com.

43. S. Gibson, « High-Performance Computing Use Cases », *op. cit.* ; S. Shah, « How Long until Cloud Becomes the Preferred Environment to Run HPC Workloads? », Computer Weekly, 27 janvier 2021, disponible sur : www.computerweekly.com ; Alliance des Sciences et Technologies du Numérique, « Infrastructure de recherche pour l'Intelligence artificielle », Rapport, janvier 2018.

44. *Ibid.*

45. TSMC, « High-Performance Computing Platform », non daté, disponible sur : www.tsmc.com.

activité actuelle relative aux smartphones⁴⁶ ».

Supercalculateurs européens : vers un rattrapage ?

En 2018, le président de la Banque européenne d'investissement (BEI) regrettait que, « tandis qu'un tiers de la demande mondiale en capacités HPC vient de l'industrie, des PME et des chercheurs européens [...], seulement 5 % des capacités HPC [sont] fournies par des centres HPC européens⁴⁷ ». L'Europe compte un fournisseur majeur de supercalculateurs, Atos, mais elle cherche aussi à déployer plus de machines sur le continent à travers des projets de collaboration, ainsi qu'à développer des capacités dans les domaines de la chaîne de valeur HPC où elle est totalement absente, comme celui des processeurs.

Les limites de la puissance de calcul européenne

L'entreprise française Atos-Bull est la seule entreprise européenne de matériel HPC. Elle est le résultat d'un travail successif de plusieurs gouvernements pour que la France devienne suffisamment autonome sur le plan industriel pour développer et entretenir des systèmes d'armes nucléaires. Cet objectif a influencé tout le programme technico-industriel de la France d'après-guerre en matière de télécommunications, d'énergie atomique, de capacités spatiales et de science informatique. L'embargo américain sur les exportations vers la France d'équipement informatique de pointe, de peur qu'il ne tombe entre les mains de l'Union soviétique, était une raison supplémentaire de se doter d'une entreprise française de supercalculateurs⁴⁸. Quand Bull a été racheté par General Electric en 1964, privant l'Europe de concurrence face aux entreprises américaines dans un secteur stratégique, la France a lancé le Plan Calcul pour soutenir l'émergence

46. A. Patterson, « TSMC Bets on HPC for Future Growth », EE Times Asia, 22 octobre 2020, disponible sur : www.eetasia.com. Le P.-D.G. de TSMC, C. C. Wei, a déclaré en avril 2021 : « Nous assistons à une augmentation structurelle de la demande sous-jacente en semi-conducteurs, car la grande tendance pluriannuelle des applications liées à la 5G et au HPC devrait alimenter une forte demande pour nos technologies avancées au cours des prochaines années... la demande pour notre famille N5 devrait continuer à croître au cours des prochaines années, grâce à la forte demande en applications liées aux smartphones et au HPC. » Voir C. C. Wei « Q1 2021 Taiwan Semiconductor Manufacturing Co Ltd Earnings Call », Transcription, 15 avril 2021, disponible sur : <https://investor.tsmc.com>.

47. B.-S. Gigler *et al.*, « Financing the Future of Supercomputing », *op. cit.*, p. 1.

48. J. W. Cortada, « Public Policies and the Development of National Computer Industries in Britain, France, and the Soviet Union, 1940–80 », *Journal of Contemporary History*, vol. 44, n° 3, p. 504.

d'un champion national français en informatique. Le plan n'est pas parvenu à créer un tout nouvel acteur industriel, mais Bull a fini par être nationalisé en 1982, avant d'être à nouveau privatisé en 1994. Atos a finalement racheté Bull en 2014.

Ces deux dernières décennies, Bull, puis Atos-Bull, a été un acteur important dans l'industrie des supercalculateurs. Depuis 2001, cinq ans après le lancement de son programme de simulation nucléaire (« *Simulation* »), le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA, qui supervise la force de dissuasion nucléaire française) s'est efforcé d'acquérir une industrie HPC nationale et « souveraine⁴⁹ ». Le CEA s'est engagé dans un partenariat avec Bull, qui a présenté sa première machine au CEA (*TERA-10*) en 2005. Bull comptait trois machines dans le top 20 mondial en 2012. Aujourd'hui, Atos-Bull continue de collaborer avec le CEA pour *Simulation*, ainsi que de manière générale avec le ministère des Armées pour d'autres utilisations. Désormais, c'est le besoin en informatique 3D pour les futures générations d'armes nucléaires qui motive la recherche d'ordinateurs encore plus puissants et le développement des machines exaflopiques.

Atos et les autres entreprises européennes ne sont cependant pas présentes tout le long du cycle de production des supercalculateurs. Atos possède son propre système d'interconnexion (BXI) mais dépend de fabricants non européens pour ses processeurs : les entreprises américaines AMD, Intel et Nvidia. Comme l'a suggéré un représentant d'Atos, l'entreprise est en effet « agnostique » en ce qui concerne ses fournisseurs d'unités de traitement⁵⁰. Les autorités françaises et européennes ont toutefois identifié l'absence de fournisseurs européens comme un problème et cherchent à élaborer des solutions alternatives. En 2019, le directeur de la branche militaire du CEA a estimé que, si le CEA a toujours travaillé avec Intel, il devrait exister à l'avenir un « processeur européen souverain » car la France « ne [veut] pas être soumise à une incapacité d'avoir ces processeurs-là⁵¹ ».

Les choix publics en matière de fournisseurs constituent un autre problème. Les programmes publics d'approvisionnement déterminent les perspectives des fournisseurs de matériel HPC. C'est notamment vrai pour les entreprises qui ont peu de chance de vendre sur des marchés étrangers. Aujourd'hui, les États-Unis et la Chine gardent

49. « Audition de M. François Geleznikoff, Directeur des applications militaires du CEA », Commission des Affaires étrangères, de la Défense et des Forces armées du Sénat, 27 novembre 2019, disponible sur : www.senat.fr.

50. Entretien avec Philippe Duluc, Directeur technique de la division Big Data et Sécurité, Atos, 12 juillet 2021.

51. « Audition de M. François Geleznikoff », *op. cit.*

l'accès à leur marché fermé aux fournisseurs étrangers. Aux États-Unis, l'industrie nationale est fermement soutenue par une obligation « d'acheter américain » en matière de supercalculateurs⁵². Une entreprise européenne comme Atos a donc peu d'espoir d'exporter ses machines aux États-Unis ou en Chine, et son marché est principalement limité à l'Europe (dont le Royaume-Uni), au Brésil et à l'Inde⁵³. En outre, contrairement aux États-Unis ou à la Chine, les marchés publics de l'UE sont ouverts aux entités hors UE, une pratique qui ne favorise pas toujours les fournisseurs locaux. On peut d'ailleurs s'étonner que le *Jean Zay*, le plus grand et le plus récent supercalculateur du Centre national de la recherche scientifique (CNRS), ait été construit par HPE et non Atos. De nouvelles initiatives visent à stimuler le secteur HPC européen (voir ci-dessous), mais des débats ont été soulevés sur la question de donner ou non la priorité aux fournisseurs basés en UE sur les choix d'approvisionnement public. Cela pourrait changer avec l'instrument relatif aux marchés publics internationaux, une nouvelle mesure législative actuellement en négociation à Bruxelles, qui pourrait introduire un principe de réciprocité dans l'ouverture des marchés publics, en réponse à des lois comme le *Buy American Act*⁵⁴.

L'absence d'entreprises européennes de services HPC de *cloud computing* constitue un frein supplémentaire. En Europe, les prestataires de services *cloud* restent principalement des entreprises américaines. Par exemple, l'entreprise française Atos s'est engagée dans un partenariat avec Google Cloud pour fournir une solution *cloud* hybride pour l'analyse de données et l'apprentissage automatique⁵⁵. Cela pose néanmoins des problèmes de protection des données⁵⁶. La BEI a par conséquent encouragé le développement d'offres *cloud* européennes, notamment pour des utilisations HPC⁵⁷.

Enfin, l'Europe rencontre un problème de financement. En 2018, la BEI a encouragé de grands investissements dans l'infrastructure, l'accès au *big data* et dans des solutions de logiciels complexes sur-mesure⁵⁸. Mariya Gabriel, alors Commissaire européenne à l'économie et à la société numériques, avait identifié un déficit de financement de

52. B.-S. Gigler *et al.*, « Financing the Future of Supercomputing », *op. cit.*, p. 46.

53. Top 500, « Statistics: Sublist Generator », non daté, disponible sur : www.top500.org.

54. J. Titievskaia, « EU International Procurement Instrument », Service de recherche du Parlement européen, Briefing, mars 2020 ; J. Hanke Vela, « EU Readies Response to Biden's 'Buy American' Pitch », Politico, 4 mai 2021.

55. Atos, « Atos acquiert Maven Wave, partenaire privilégié de Google Cloud », Communiqué de presse, 18 décembre 2019, disponible sur : <https://atos.net>.

56. Voir A. Pannier, « The Changing Landscape of European Cloud Computing: Gaia-X, the French National Strategy, and EU Plans », *Briefings de l'Ifri*, Ifri, 22 juillet 2021.

57. B.-S. Gigler *et al.*, « Financing the Future of Supercomputing », *op. cit.*, p. 50.

58. *Ibid.*, p. 1.

l'ordre de 500 à 750 millions d'euros par an, par rapport aux États-Unis, à la Chine ou au Japon⁵⁹. L'une des conclusions du rapport était qu'aucun pays en Europe n'a la capacité à lui seul de construire et d'entretenir de manière viable un écosystème HPC exaflopique dans un délai concurrentiel.

Le projet d'entreprise commune EuroHPC

Son utilisation étant de plus en plus courante, le HPC est devenu ces dernières années une priorité pour la plupart des États membres de l'UE, qui ont cherché à repousser les limites de la puissance de calcul européenne. Ce besoin est devenu encore plus urgent à partir de 2015, suite à la mise au point de stratégies HPC américaine et chinoise. Une pression a donc surgi en Europe pour construire des ordinateurs exaflopiques, et pour que l'Europe ne soit plus seulement consommatrice, mais aussi productrice de puissance de calcul⁶⁰. Au sein de l'Europe, Thierry Breton, actuel commissaire européen à l'industrie et ancien P.-D.G. d'Atos, a fermement appuyé cette résolution⁶¹. Cela s'est traduit par de nouvelles initiatives HPC et de nouveaux financements à l'échelle européenne, dans le cadre d'un programme plus vaste pour des infrastructures numériques européennes.

Deux initiatives sont actuellement déployées en Europe : un programme pour construire des supercalculateurs européens, incluant le HPC exaflopique, appelé l'entreprise commune EuroHPC, et un programme pour élaborer un microprocesseur européen pour l'informatique à échelle extrême, appelé European Processor Initiative ou EPI. En 2017, sept États membres (l'Allemagne, le Portugal, la France, l'Espagne, l'Italie, le Luxembourg et les Pays-Bas) ont signé une déclaration établissant l'entreprise commune EuroHPC. L'entité légale de financement a été créée en 2018. La DG CONNECT de la Commission européenne a réalisé une grande part du travail initial, avant que l'EuroHPC ne devienne autonome en septembre 2020⁶². Par ailleurs, deux acteurs privés (la Big Data Value Association et ETP4HPC) ont rejoint le partenariat public-privé, ainsi que plusieurs pays, dont la Norvège et la Turquie (mais pas le Royaume-Uni), le portant ainsi à 33 membres.

59. *Ibid.*, p. 2.

60. Entretien avec Marie-Hélène Pautrat, Directrice des partenariats européens, Inria, 9 avril 2021.

61. *Ibid.*

62. Anders Jensen, Directeur exécutif de l'entreprise commune pour le calcul à haute performance européen (EuroHPC), à la Supercomputing Frontiers Conference 2021, 19 juillet 2021, enregistrement vidéo disponible sur : <https://supercomputingfrontiers.eu>.

Il s'agit d'un principe de co-financement entre l'UE, les États membres et les acteurs privés, fédérés au sein d'une association. Les pays et entités participants coordonnent leurs efforts et regroupent leurs ressources. Pendant la phase initiale de 2019-2021, l'entreprise commune disposait d'un budget d'un milliard d'euros. Le 13 juillet 2021, le Conseil européen a adopté un règlement établissant l'EuroHPC, permettant ainsi de poursuivre les activités existantes⁶³. Ce nouveau règlement permettra d'accroître le budget, les effectifs et les missions de l'initiative. Le financement européen de l'EuroHPC pour 2021-2027 (auquel doit s'ajouter une contribution égale des États participants) viendra de Digital Europe (2 milliards d'euros), Horizon Europe (900 millions d'euros) et du mécanisme pour l'interconnexion en Europe (200 millions d'euros).

Le financement sera utilisé pour atteindre un double objectif : déployer une infrastructure informatique haut de gamme à travers l'Europe pour satisfaire les besoins des utilisateurs et élaborer un écosystème de recherche et d'innovation pour les technologies HPC en Europe. L'EuroHPC vise à mettre en œuvre deux machines exaflopiques d'ici 2023, que la France et l'Allemagne espèrent accueillir⁶⁴. En France, le partenariat entre le CEA et Atos-Bull, *via* GENCI, vise à accompagner le développement de l'exaflopique et de la machine qui succédera au *TERA 1000*. En novembre 2020, il a été décidé d'intégrer la technologie de processeur A64FX de Fujitsu, celle qui équipe le *Fugaku*, pour construire le premier ordinateur exaflopique français.

Avant que les machines exaflopiques ne voient le jour, huit structures d'accueil à travers l'Europe ont été sélectionnées pour accueillir les cinq machines pétaflopiques et les trois machines pré-exaflopiques. Chacune des cinq machines pétaflopiques vaudra entre 12 et 30 millions d'euros⁶⁵. Le premier supercalculateur, le *Vega* d'Atos, a été inauguré en Slovénie en mars 2021.

Le programme prévoit aussi trois machines pré-exaflopiques (de 10^{17} flops). Deux d'entre elles sont en construction : la première, LUMI, en Finlande (Cray-HPE, avec des processeurs et des GPU d'AMD) et la deuxième, Leonardo, en Italie (Atos, avec des GPU de Nvidia),

63. Conseil de l'UE, « Entreprise commune pour le calcul à haute performance européen : le Conseil adopte un règlement », Communiqué de presse, 13 juillet 2021, disponible sur : www.consilium.europa.eu.

64. Commission européenne, « Supercomputing in the DIGITAL Europe Programme », dernière modification le 4 août 2021, disponible sur : <https://digital-strategy.ec.europa.eu> ; Entretien avec Marie-Hélène Pautrat, Directrice des partenariats européens, Inria, 9 avril 2021.

65. S. Van Dorpe, « Supercomputer Scrap ».

respectivement d'une valeur de 144 et 120 millions d'euros⁶⁶. La troisième, MareNostrum 5, sera accueillie par le Centre de superinformatique de Barcelone, mais son approvisionnement est actuellement en suspens. Concernant ce dernier cas, la volonté commune de procurer aux utilisateurs des machines pétaflopiques et exaflopiques afin de satisfaire leurs besoins entre en conflit avec un autre objectif, celui de soutenir et développer les capacités industrielles européennes en HPC. Deux offres étaient en concurrence pour remporter le marché : un consortium sino-américain entre IBM et Lenovo, et Atos. L'évaluation technique initiale a montré que IBM et Lenovo proposaient une machine plus puissante à un meilleur prix. L'avantage d'Atos, en revanche, était d'avoir une chaîne d'approvisionnement plus ancrée en Europe : la question était donc de savoir si cela devait être un critère déterminant en faveur d'Atos⁶⁷. Le critère « valeur ajoutée de l'UE » adopté par l'EuroHPC prévoit en effet d'évaluer le degré auquel une offre « renforce la chaîne d'approvisionnement de technologie numérique dans l'Union⁶⁸ ». Au vu de cette exigence, le comité consultatif de l'EuroHPC a recommandé d'opter pour l'offre d'Atos : un choix soutenu par la France, mais pas par l'Espagne. La question avait pris une telle ampleur qu'elle a fait l'objet en mars 2021 d'une discussion entre le Premier ministre espagnol, Pedro Sanchez, et le président français, Emmanuel Macron. En mai 2021, l'EuroHPC a annulé l'appel d'offres, sous prétexte que la pandémie de Covid-19 avait modifié le cahier des charges pour la machine⁶⁹.

L'avenir des supercalculateurs européens : efficacité énergétique et souveraineté technologique ?

Le temps d'accès aux machines de l'EuroHPC sera alloué aux utilisateurs européens des secteurs scientifique, industriel et public de façon à maximiser l'effet bénéfique de ces systèmes sur la R&I. Le second objectif de l'EuroHPC, parallèlement au déploiement d'une infrastructure, est en effet de développer un écosystème HPC en R&I en Europe, qui inclut des capacités, des applications, des formations et

66. *Ibid.*

67. *Ibid.*

68. Commission européenne, « European High Performance Computing Joint Undertaking: General Invitation to Tender », SMART 2019/1084, Document descriptif, disponible sur : <https://etendering.ted.europa.eu>.

69. S. Van Dorpe, « Supercomputer Scrap ».

des compétences matérielles et logicielles⁷⁰. Cet écosystème devrait à son tour contribuer au double objectif de l'Europe : le Pacte vert et la souveraineté technologique.

La consommation énergétique est une question importante pour le développement de la puissance de calcul et l'économie des données. L'immense augmentation de la puissance de calcul et de la consommation d'énergie est en grande partie le fait de l'entraînement des programmes d'apprentissage automatique. Au-delà des préoccupations environnementales, cela a aussi un coût économique. La facture d'électricité d'un supercalculateur s'élève à des dizaines de millions d'euros par an⁷¹. Le *Fugaku* consomme 30 à 40 mégawatts, avec un coût annuel allant jusqu'à 40 millions d'euros⁷². Pour un pays comme la France, le déploiement d'une machine exaflopique relève moins d'un problème technique que financier. En France, le budget actuel alloué au HPC permet seulement de consommer la moitié de cette énergie⁷³.

Comme l'exige le Pacte vert européen, tout programme de développement HPC en Europe doit aborder la question de l'efficacité énergétique. L'Europe est déjà bien placée dans le classement Green500, un autre classement de Top500 qui s'intéresse à l'efficacité énergétique (en gigaflops/watt) des supercalculateurs : quatre machines d'Atos-Bull figurent parmi les dix premiers, ce qui est mieux que dans le classement principal, où seulement une machine d'Atos-Bull figure dans le top 10⁷⁴ (voir Tableau 2). L'UE prévoit de poursuivre sur cette voie. Dans le cadre de l'EuroHPC, les laboratoires qui se proposent d'accueillir les machines doivent être exemplaires en matière d'efficacité énergétique. Par exemple, le LUMI, qui est en cours d'installation en Finlande, sera alimenté par l'énergie hydraulique d'une rivière voisine.

Les deux objectifs de l'Europe, Pacte vert et souveraineté technologique, se recoupent en matière de processeurs : non seulement les processeurs jouent un rôle important dans l'efficacité énergétique d'une machine, mais ces deux dernières années ont prouvé que dépendre de l'étranger pour ce genre de technologie présente aussi un risque de perturbations⁷⁵.

70. Le nouveau règlement relatif à l'entreprise commune entrée en vigueur en août 2021 inclut aussi des domaines d'activité supplémentaires, dont la fédération, la protection et l'hyper-connexion des supercalculateurs, ainsi que l'examen d'infrastructures d'informatique quantique similaires à EuroHPC à l'avenir (voir ci-dessous).

71. Inria, « Optimiser le calcul haute performance, un défi scientifique et écologique », 14 avril 2021, disponible sur : www.inria.fr.

72. Entretien avec Jacques-Charles Lafoucrière, Chef de projet informatique, CEA, 26 juillet 2021.

73. *Ibid.*

74. Top500, « Green500 », juin 2021, disponible sur : www.top500.org.

75. Conseil de l'UE, « Orientation générale du Conseil sur le règlement établissant l'entreprise commune EuroHPC », mai 2021, p. 28, para. 16.

Le projet de microprocesseurs européens à faible consommation, appelé European Processor Initiative (EPI), a été lancé en 2015 et a débuté concrètement en 2018. Il rassemble 28 partenaires publics et privés, dont le CEA, STMicroelectronics, BMW et plusieurs universités et laboratoires de recherche, et est coordonné par Atos. L'EPI aboutira à des processeurs sophistiqués pour des applications HPC. Les principales orientations pour des processeurs de première génération ont été annoncées en juin 2019 et cette vision a été matérialisée par le lancement opérationnel de SiPearl, une *start-up* chargée de la conception des puces. Un premier prototype de processeur, Rhea (fondé en grande partie sur une conception de l'entreprise britannique ARM), a été présenté en janvier 2020. SiPearl espère lancer Rhea en 2022 et le développer à temps pour les supercalculateurs exaflopiques européens en 2023. Outre les supercalculateurs, SiPearl souhaite développer des microprocesseurs pour d'autres marchés, plus larges, comme les véhicules autonomes, l'*edge computing* et les centres de données⁷⁶.

L'efficacité énergétique des processeurs de l'EPI sera colossale : SiPearl promet de réduire de moitié la consommation énergétique des supercalculateurs⁷⁷. En principe, ils rempliront aussi un rôle politique et stratégique, puisqu'ils sont « fièrement conçus en Europe pour affirmer la souveraineté technologique de l'Europe⁷⁸ ». Pour l'instant, l'entreprise fait néanmoins face à un manque d'investissement : le secteur HPC est actuellement financé en grande partie par des budgets et subventions nationaux ou européens, mais les investissements privés manquent pour rendre le projet viable⁷⁹. Enfin, il convient de souligner que ces processeurs seront en effet *conçus* en Europe, mais les puces seront très probablement fabriquées par TSMC.

76. T. Trader, « ISC21 Preview: EPI Chair Jean-Marc Denis Shares Vision for Future Supercomputers », HPCwire, 24 juin 2021, disponible sur : www.hpcwire.com.

77. European Processor Initiative, « Project: EPI », non daté, disponible sur : www.european-processor-initiative.eu.

78. SiPearl, Dossier de presse, janvier 2020, disponible sur : <https://sipearl.com>.

79. Entretien avec Jacques-Charles Lafoucrière, Chef de projet informatique, CEA, 26 juillet 2021 ; B.-S. Gigler *et al.*, « Financing the Future of Supercomputing », *op. cit.*, p. 36.

L'informatique quantique

D'après la loi de Moore, la puissance de calcul double tous les deux ans, puisque le nombre de transistors sur les circuits intégrés double lui aussi. Cette évolution est favorisée par la réduction graduelle de la taille des semi-conducteurs, ainsi que par d'autres avancées en électronique numérique. Cependant, cette loi arriverait bientôt à son terme, puisque les puces informatiques nanométriques sont en passe d'atteindre leurs limites physiques. D'après un rapport de 2018 de la BEI, « d'ici 2025, les configurations matérielles pourraient atteindre les limites des capacités d'augmentation exponentielle » des ordinateurs classiques⁸⁰. Contrairement aux contraintes physiques des ordinateurs classiques, l'informatique quantique exploite les caractéristiques de la physique quantique et promet de multiplier la puissance de calcul de manière exponentielle. Par conséquent, l'informatique quantique est devenue un domaine stratégique, dans lequel gouvernements, laboratoires de recherche et entreprises technologiques investissent de plus en plus, dans l'optique d'exploiter l'avantage quantique.

Une révolution dans l'informatique

Les sciences de l'informatique quantique émergent de l'observation selon laquelle la physique quantique (c'est-à-dire, au niveau atomique ou subatomique) a des implications sur la façon dont des systèmes informatiques traitent l'information. Partant, des effets quantiques peuvent être exploités pour calculer l'information. L'informatique quantique est un segment du domaine des sciences de l'information quantique, qui est très vaste et inclut aussi la communication et la cryptographie, la métrologie et la détection, ainsi que la simulation, avec une grande diversité de domaines d'application⁸¹. Les technologies de l'information quantique se trouvent actuellement à

80. B.-S. Gigler *et al.*, « Financing the Future of Supercomputing », *op. cit.*, p. 46.

81. Cette étude ne s'intéresse qu'à l'informatique quantique, mais il y a beaucoup d'applications stratégiques possibles pour d'autres technologies quantiques. Par exemple, la détection quantique par satellite et le traitement amélioré des images pourraient permettre d'identifier des installations nucléaires souterraines, tandis que les gravimètres quantiques pourraient considérablement améliorer la précision de forage en détectant les fluctuations de densité qui indiquent la présence de gisements de pétrole ou de minéraux. Les radars quantiques pourraient, eux, déjouer la furtivité et résister à des formes avancées de brouillage. Voir G. Brennen *et al.*, « An Australian Strategy for the Quantum Revolution », p. 14-15 ; K. M. Sayler, « Defense Primer: Quantum Technology », Congressional Research Service, In Focus, 7 juin 2021.

différents stades d'avancement. Par rapport aux applications de détection et de cybersécurité, l'informatique quantique est loin d'être prête à la commercialisation, mais elle présente néanmoins le potentiel de rupture le plus élevé⁸².

Vers des ordinateurs quantiques : progrès et défis technologiques

Principes de l'informatique quantique

L'apparition de l'informatique quantique est récente et son développement s'est accéléré ces dernières années. En 1995, des scientifiques ont compris que les algorithmes quantiques rendraient des calculs possibles en un temps record, et que cela posait des défis de sécurité pour les systèmes d'information⁸³. L'année suivante, IBM posait les premiers principes de l'ordinateur quantique et présentait le premier ordinateur de 2 bits quantiques (qubits). Cinq ans plus tard, en 2001, les chercheurs d'IBM parvenaient à factoriser le nombre 15 avec des qubits.

Les ordinateurs quantiques, en exploitant les propriétés spéciales de la matière en mécanique quantique, représentent un tout nouveau paradigme en informatique, que ce soit en termes matériels ou logiciels. En informatique classique, le bit est l'unité de base pour stocker des informations. Sa valeur est 1 ou 0. En informatique quantique, de manière assez contre-intuitive, l'unité de base, le bit quantique, peut-être « plus ou moins 0 » et « plus ou moins 1 », dans des proportions variables⁸⁴. Cette superposition d'états donne des effets multiplicateurs aux ordinateurs quantiques par rapport aux ordinateurs classiques : tandis qu'un ordinateur classique peut fournir le résultat d'un calcul au terme d'une chaîne d'instructions successives, les qubits permettent 2^N combinaisons simultanées et fournissent une solution instantanée au moment de la mesure (sans toutefois indiquer le processus). Par conséquent, les machines quantiques permettent d'accomplir certains calculs exponentiellement plus vite qu'avec des ordinateurs classiques.

82. Quantonation, « Portfolio », non daté, disponible sur : www.quantonation.com.

83. CIGREF, « Informatique quantique : Comprendre le *quantum computing* pour se préparer à l'inattendu », Rapport, février 2020.

84. En physique classique, on peut déterminer l'état d'un objet, sa position, sa vitesse, sa masse, etc. En physique quantique, une particule peut être X % dans un état (par exemple, excité ou fondamental), Y % dans un autre état et Z % dans un troisième état. Ces variations sont probabilistes et lorsqu'on mesure un qubit, sa valeur de sortie sera soit 0 soit 1 (la richesse des états quantiques n'intervient donc qu'avant la mesure). Voir A. Middleton *et al.*, « Quantum Information Processing Landscape 2020: Prospects for UK Defence and Security », Defence Science and Technology Laboratory, Rapport No. DSTL/TR121783, juin 2020, Appendice A.

Une diversité de pistes technologiques

Pour exploiter les propriétés de la physique quantique, un ordinateur quantique manipule les états des particules à l'aide de lasers ou de champs électriques et magnétiques. Différentes technologies de processeurs quantiques sont actuellement en phase d'expérimentation dans les laboratoires de recherche quantique. La plupart des équipes industrielles, dont IBM et Google, ainsi que le Royaume-Uni, en collaboration avec l'entreprise californienne Rigetti, se concentrent sur les bits quantiques à base de circuits supraconducteurs refroidis à des températures extrêmes proches du zéro absolu, auxquelles certains matériaux conduisent l'électricité sans aucune résistance⁸⁵. Il s'agit du procédé à bits quantiques le plus avancé⁸⁶. La technique des « ions piégés » est, elle aussi, très prometteuse. Elle consiste en des atomes (ions) électriquement chargés, refroidis et « piégés » avec des lasers. Cette technique est expérimentée par Honeywell, IonQ (financé par les Émirats arabes unis avec l'université du Maryland) et le projet Quantum Flagship de l'UE, « AQTION » (*Advanced Quantum computing with Trapped IONs*). Des technologies photoniques sont aussi en cours de développement, notamment par l'Université de sciences et technologie de Chine. En fonction des pistes de recherches, l'émergence de l'informatique quantique s'accompagne d'avancées dans d'autres domaines scientifiques et technologiques : les nanotechnologies, la cryogénie, la science des matériaux, les lasers, etc.

Il est pour le moment difficile de savoir quelles technologies finiront par prévaloir⁸⁷. Les gouvernements, les entreprises et les investisseurs doivent adopter un état d'esprit « darwinien » : même si les ordinateurs quantiques n'en sont qu'au stade expérimental, il serait risqué de parier sur leur échec ou de préférer une technique à une autre⁸⁸. Il est probable que différents types de systèmes d'informatique quantique finissent par coexister.

Des défis persistants

Le physicien américain John Preskill a élaboré le concept de « suprématie quantique », qui peut être atteinte lorsqu'une machine quantique résout un problème mathématique qu'aucun ordinateur classique n'est capable de résoudre, en raison de contraintes

85. E. B. Kania et J. K. Costello, « Quantum Hegemony? China's Ambitions and the Challenge to U.S. Innovation Leadership », Rapport, CNAS, 2018 ; J. Kung et M. Fancy, « A Quantum Revolution: Report on Global Policies for Quantum Technology », CIFAR, avril 2021.

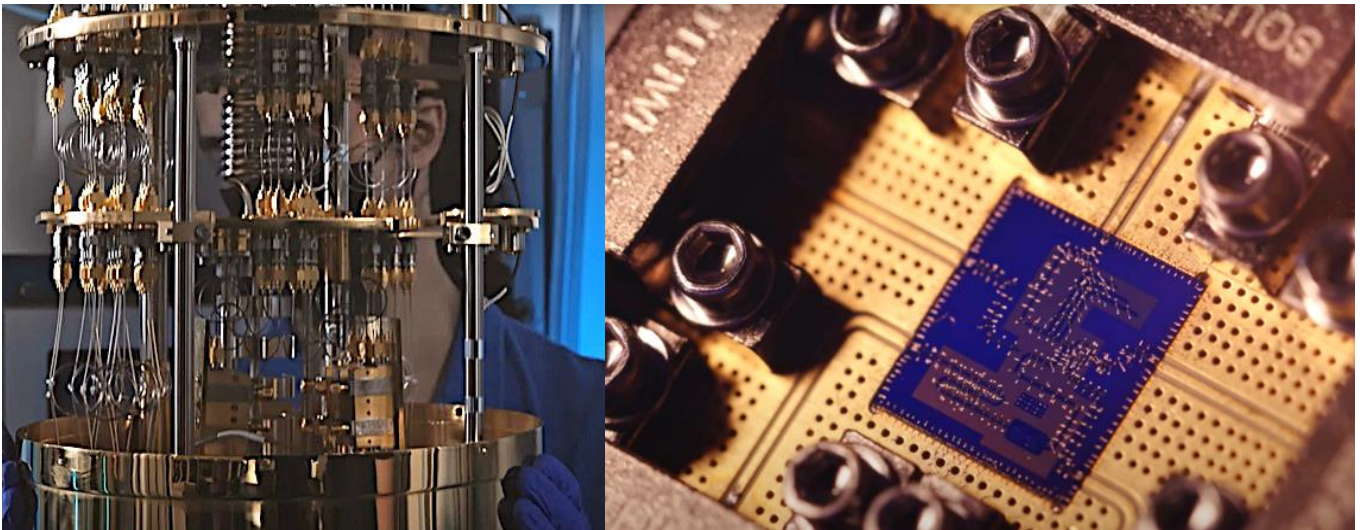
86. CIGREF, « Informatique quantique », *op. cit.*, p. 36.

87. J. Kung et M. Fancy, « A Quantum Revolution », *op. cit.*

88. Entretien avec Emmanuel Jeannot, Délégué scientifique de l'Inria Bordeaux – Sud-Ouest, 28 juillet 2021.

matérielles. Par exemple, un calcul dont la résolution nécessiterait des millions d'années ou plus de particules qu'il n'en existe dans l'univers⁸⁹. Des laboratoires américains et chinois se sont lancés avec succès dans une course à la « suprématie quantique » (voir ci-dessous). Cependant, la plupart des gouvernements, des laboratoires de recherche et des *start-ups* à travers le monde cherchent à exploiter « l'avantage quantique » et développer des applications pratiques de l'informatique quantique. L'avantage quantique reviendra à combiner une machine quantique à une machine classique pour atteindre un niveau d'accélération du calcul suffisamment important pour générer un avantage par rapport aux machines classiques. On ignore cependant à ce jour comment et quand l'industrie parviendra à créer un ordinateur quantique capable de résoudre un problème pertinent plus rapidement qu'un ordinateur classique pour des utilisations commerciales concrètes⁹⁰.

Chandelier (cryostat) et processeur de la *start-up* française Alice & Bob



Source : Youtube.

D'après le Département de l'Énergie américain, nous nous trouvons actuellement au même stade de développement de l'informatique quantique que les scientifiques des années 1950 lorsque les ordinateurs conventionnels fonctionnaient avec des tubes à vide⁹¹. La technologie actuelle des ordinateurs classiques est suffisamment

89. Entretien avec Neil Abroug, Coordinateur national pour la stratégie quantique, Secrétariat Général pour l'Investissement, 30 juin 2021.

90. M. Swayne, « IBM Unveils Japan's First Commercial Quantum Computer », The Quantum Insider, 27 juillet 2021, disponible sur : <https://thequantuminsider.com>.

91. Office of Science, « Calculating the Benefits of Exascale and Quantum Computers », 28 juillet 2020, disponible sur : www.energy.gov.

performante pour pouvoir créer, transférer et stocker des informations avec un taux de fiabilité proche de 100 %, et peu de ressources (mémoire, processeur) sont nécessaires pour corriger les inévitables erreurs dues aux composants électroniques. Les ordinateurs quantiques en sont encore loin : ils restent extrêmement sensibles aux interactions avec leur environnement (le « bruit »), qui affecte les propriétés des qubits et la qualité de l'*output*. Les simples vibrations ordinaires du bâtiment qui abrite une machine quantique peuvent faire « décohérer » les qubits et leur faire perdre leurs informations quantiques programmées⁹². De plus, le matériel quantique nécessite un câblage complexe pour contrôler et mesurer les qubits, ce qui introduit aussi du bruit, de manière croissante à mesure que le nombre de qubits augmente⁹³. Ainsi, le défi majeur est de remédier au bruit et aux erreurs causées par la fragilité des systèmes quantiques⁹⁴. La correction du bruit est donc un axe de travail central dans la recherche quantique, à travers l'adaptation du code, des algorithmes et du matériel.

Aujourd'hui, les ordinateurs NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) constituent une première génération d'ordinateurs quantiques qui ne sont pas très précis, mais qui permettent de faire la démonstration des technologies et de la validité des algorithmes. Ils offrent un terrain d'expérimentation pour identifier les cas d'usages et développer des algorithmes quantiques. Les utilisations pratiques viendront plus tard. Les ordinateurs NISQ contiennent entre 50 et quelques centaines de qubits. En dessous de 40 qubits, un ordinateur classique peut rivaliser avec une machine quantique, mais au-dessus de 60 qubits, un ordinateur quantique sera toujours plus rapide⁹⁵.

Selon les estimations, un ordinateur quantique peut commencer à être utilisé de manière concrète et avoir des implications de cybersécurité à partir de 1 000 à 5 000 qubits⁹⁶. Le « Graal » de la science de l'informatique quantique⁹⁷, qui changerait réellement la donne⁹⁸, serait toutefois l'avènement d'ordinateurs quantiques universels à grande échelle (appelés ordinateurs Large Scale Quantum, LSQ). Mais leur arrivée reste incertaine⁹⁹. Si certains, comme Google,

92. IBM, « Five Years Ago Today, We Put the First Quantum Computer on the Cloud. Here's How We Did It », 4 mai 2021, disponible sur : <https://research.ibm.com>.

93. M. Swayne, « OQC Delivers the UK's First Quantum Computing as-a-Service », *The Quantum Daily*, 7 juillet 2021, disponible sur : <https://thequantumdaily.com>.

94. J. Kung et M. Fancy, « A Quantum Revolution », *op. cit.*

95. Entretien avec Philippe Duluc, Directeur technique de la division Big Data et Sécurité, Atos, 12 juillet 2021.

96. CIGREF, « Informatique quantique », *op. cit.*, p. 35.

97. *Ibid.*, p. 36

98. E. Gibney, « Quantum Gold Rush: The Private Funding Pouring into Quantum Start-Ups », News Feature, *Nature*, 2 octobre 2019, disponible sur : www.nature.com.

99. *Ibid.*

ont déjà réussi à effectuer des calculs quantiques qui démontrent la suprématie quantique¹⁰⁰, le taux d'erreur est si élevé qu'ils sont encore loin d'accomplir les promesses de l'informatique quantique. Aujourd'hui, les meilleurs qubits commettent une erreur toutes les 1 000 opérations, ce qui représente 10 milliards de milliards d'erreurs de plus qu'un ordinateur classique¹⁰¹. La plupart des spécialistes affirment ainsi que pour avoir un taux de correction d'erreurs satisfaisant, ces ordinateurs auraient besoin de millions de qubits¹⁰². Cela pose un problème de volume : actuellement, un ordinateur quantique expérimental de quelques douzaines de qubits occupe une pièce entière, notamment en raison des exigences de réfrigération et de protection. Une autre option est de développer des qubits capables de limiter ou de corriger les erreurs. Dans un cas comme dans l'autre, il est nécessaire de développer des technologies qui puissent être fabriquées à grande échelle.

Deux autres axes de travail sont nécessaires : l'intégration d'ordinateurs classiques et quantiques, et la conception logicielle. Les ordinateurs quantiques ne fonctionneront pas indépendamment, mais, du moins à moyen terme, en association avec des ordinateurs classiques. Un ordinateur classique sera capable de s'occuper de la majeure partie de l'information et du traitement des données, tandis que la partie quantique de la machine s'occupera de résoudre des problèmes spécifiques¹⁰³. La réalisation de machines hybrides qui intègrent des ordinateurs quantiques et classiques pose encore beaucoup de difficultés techniques aussi bien au niveau logiciel que matériel¹⁰⁴.

En ce qui concerne la partie logicielle, les entreprises conçoivent actuellement des logiciels fonctionnant sur des supercalculateurs classiques capables d'imiter des ordinateurs quantiques fonctionnels, ainsi que des émulateurs d'ordinateur quantique. La taille des circuits qu'il est possible d'émuler est cependant limitée¹⁰⁵. En vertu des lois de la physique quantique, un ordinateur classique peut seulement simuler

100. Il convient de noter que les problèmes résolus au cours des récentes expériences de Google pour prouver la suprématie quantique n'ont pas d'application pratique.

101. S. Rolland, « Course à l'ordinateur quantique : 'Alice & Bob' aura besoin de nouveaux financements face à la concurrence d'Amazon' », *La Tribune*, 8 mai 2021.

102. CIGREF, « Informatique quantique », *op. cit.*, p. 36. Cela dépend toutefois du type de qubit, puisque les taux d'erreur varient.

103. Entretien avec Julian van Velzen, Julian van Velzen, Directeur du Quantum Lab, Capgemini, 20 juillet 2021.

104. *Ibid.*, et entretien avec Philippe Duluc, Directeur technique de la division Big Data et Sécurité, Atos, 12 juillet 2021.

105. A. Middleton *et al.*, « Quantum Information Processing Landscape 2020 », *op. cit.*, p. 10-11.

un ordinateur quantique doté d'environ 40 qubits¹⁰⁶. Néanmoins, simulateurs et émulateurs permettent aux chercheurs d'expérimenter des systèmes quantiques et de développer des algorithmes capables d'utiliser leurs particularités d'ordinateurs quantiques ainsi que leurs futures applications¹⁰⁷.

Applications et implications de l'informatique quantique

Conscients du changement significatif qu'apporteront les machines quantiques, les entreprises et les gouvernements examinent les cas d'utilisation pratique des appareils intermédiaires qui pourraient être disponibles dans la prochaine décennie¹⁰⁸.

Pour commencer, les machines quantiques vont précipiter le développement de l'IA puisqu'elles permettront d'accélérer l'apprentissage profond et les réseaux neuronaux, qui auront des applications civiles comme militaires. Dans le domaine militaire, par exemple, l'IA quantique pourrait faciliter le développement de systèmes d'armes autonomes et accroître la précision du renseignement, notamment si elle est couplée à d'autres technologies quantiques.

En dehors de l'IA, les ordinateurs quantiques seront particulièrement adaptés à des tâches de factorisation, d'optimisation et de simulation. La factorisation est notamment utile en cryptographie et place les implications sur la cybersécurité des ordinateurs quantiques à grande échelle au cœur des préoccupations des États¹⁰⁹. En 2015, l'Agence nationale de la sécurité américaine (NSA) actualisait son système de cryptage pour le rendre « résistant au quantique¹¹⁰ ». Tandis que des avancées significatives sont encore nécessaires en informatique quantique pour percer les méthodes de cryptage actuelles, un ordinateur quantique entièrement opérationnel pourrait permettre à un pays ou à un acteur non étatique de percer n'importe quelle clé de cryptage publique protégée par une technologie actuelle¹¹¹. Cela concerne notamment RSA, le cryptosystème utilisé pour sécuriser les paiements en ligne. Selon certaines estimations, un ordinateur

106. Entretien avec Philippe Duluc, Directeur technique de la division Big Data et Sécurité, Atos, 12 juillet 2021.

107. E. Gibney, « Quantum Gold Rush », *op. cit.*

108. Voir HPCwire, « 12 European Companies and Research Labs Join Forces to Boost Industrial Quantum Computing Applications », 5 octobre 2020, disponible sur : www.hpcwire.com.

109. Entretien avec Olivier Ezratty, Consultant indépendant, 6 avril 2021.

110. E. B. Kania et J. K. Costello, « Quantum Hegemony? », *op. cit.*

111. J. Kung et M. Fancy, « A Quantum Revolution », *op. cit.*, p. 10.

classique mettrait 300 mille milliards d'années pour déchiffrer une clé de cryptage RSA (de 2 048 bits), tandis qu'un ordinateur quantique doté de 4 000 qubits stables pourrait en venir à bout, en théorie, en seulement dix secondes¹¹². À l'inverse, la technologie quantique peut aussi être utilisée pour sécuriser les communications¹¹³.

La simulation complexe constituera probablement une part essentielle de l'utilisation des ordinateurs quantiques. La simulation de molécules nécessite une grande puissance de calcul, puisque les liens et interactions entre les atomes se comportent de manière probabiliste, ce qui épuise la logique de l'informatique classique¹¹⁴. L'informatique quantique revient donc à « simuler la nature, en utilisant les lois de la nature¹¹⁵ ». La simulation à l'échelle moléculaire pourrait être utilisée en médecine (par exemple, pour créer des médicaments spécifiques), dans l'énergie (pour des batteries plus efficaces), dans l'agriculture durable (pour les engrais) ou même pour développer des méthodes de capture du CO₂ présent dans l'atmosphère.

Enfin, les ordinateurs quantiques pourraient être très utiles pour l'optimisation de tâches nécessaires aux véhicules autonomes. Avec une flotte entièrement autonome, le trajet individuel de chaque véhicule pourrait être optimisé en fonction de son lieu de départ et de sa destination. Des algorithmes conventionnels pourraient fonctionner pour une quantité limitée de véhicules, mais au-delà de plusieurs centaines de véhicules et de trajets, les capacités du calcul traditionnel seraient largement saturées¹¹⁶. L'optimisation est aussi un facteur essentiel pour les acteurs du secteur de l'énergie, notamment pour le développement de réseaux électriques et la gestion de la consommation dans le cadre d'une multiplication des véhicules électriques.

112. A. Herman, « Q-Day Is Coming Sooner Than We Think », *Forbes*, 7 juin 2021.

113. Les services de défense et certaines entreprises sont en train de développer une cryptographie post-quantique, fondée sur de nouveaux ensembles d'algorithmes quantiques. Cependant, la résistance de ce cryptage au quantique reste encore à prouver en l'absence d'ordinateurs quantiques compétents sur le plan cryptographique. Un autre moyen de protéger les communications à l'ère quantique est d'utiliser des technologies quantiques de protection de l'information. Par exemple, la distribution quantique de clé (QKD) utilise l'intrication quantique pour sécuriser les communications qui transitent par des câbles à fibre optique et des satellites : l'écoute d'une communication quantique serait, en théorie, immédiatement détectée. La QKD est néanmoins très coûteuse et n'est pas encore prête pour une utilisation commerciale, puisqu'elle requiert de tout nouveaux types d'infrastructures et que ses signaux sont facilement déformés. Voir M. Lee, « Quantum Computing and Cybersecurity », Belfer Center of International Affairs, Rapport, juillet 2021, p. 8-9.

114. E. Lucero, « Unveiling Our New Quantum AI Campus », Google, 8 mai 2021, disponible sur : <https://blog.google>.

115. The Quantum Daily, « Quantum Technology: Our Sustainable Future », Film documentaire, juillet 2021, disponible sur : www.youtube.com.

116. O. Ezratty, « Comprendre l'informatique quantique », septembre 2020, p. 16, disponible sur : www.oezratty.net.

Compte tenu des énormes incertitudes scientifiques et technologiques qui persistent, la totalité des implications commerciales de la technologie quantique va se déployer et se cristalliser avec le temps¹¹⁷. D'après un rapport de Boston Consulting Group, l'informatique quantique devrait arriver à maturation sur trois générations, au cours des 25 prochaines années¹¹⁸. Il est probable que les utilisations civiles ponctuelles des machines quantiques soient développées dans les 10 à 15 prochaines années, et qu'un ordinateur quantique capable de percer les méthodes de cryptage actuelles voit le jour d'ici 2040¹¹⁹.

Quoi qu'il en soit, les ordinateurs quantiques ne remplaceront pas les ordinateurs conventionnels. Ce seront des machines complexes et fragiles, avec des fonctions plus réduites que les ordinateurs universels classiques, et seront donc rares : du moins au début, seules quelques machines existeront et seront accessibles sur le *cloud*¹²⁰. Étant donné la complexité du domaine des technologies quantiques, confier ces machines aux fournisseurs *via* un *cloud* éviteraient aux entreprises de devoir développer des compétences extrêmement pointues et difficiles à acquérir¹²¹. Les ordinateurs quantiques ne viendront donc pas remplacer, mais compléter les outils HPC actuels.

Malgré ces restrictions, le calcul quantique aura des implications commerciales et financières considérables. Boston Consulting Group imagine que le marché adressable de l'informatique quantique pourrait représenter 4 milliards de livres (4,7 milliards d'euros) d'ici 2024¹²². Avec un scénario légèrement moins optimiste, le Quantum Economic Development Consortium et Hyperion Research prévoient une croissance annuelle de 27 % à partir de 2020, avec un marché mondial d'une valeur de 830 millions de dollars (701 millions d'euros) d'ici 2024¹²³.

117. *Ibid.*, p. 10.

118. M. Russo *et al.*, « The Coming Quantum Leap in Computing », Boston Consulting Group, 16 mai 2008, disponible sur : www.bcg.com.

119. Entretien avec Olivier Ezratty, Consultant, 6 avril 2021 ; CIGREF, « Informatique quantique », *op. cit.*, p. 6 ; Sayler, « Defense Primer », *op. cit.*

120. Entretien avec Julian van Velzen, Directeur du Quantum Lab, Capgemini, 20 juillet 2021.

121. CIGREF, « Informatique quantique », *op. cit.*, p. 6.

122. S. Venkataramakrishnan, « Rigetti to Build UK's First Commercial Quantum Computer », *Financial Times*, 2 septembre 2020.

123. Quantum Economic Development Consortium, « Global QC Market Projected to Grow to Over \$800 Million by 2024 », non daté, disponible sur : <https://quantumconsortium.org>.

L'Europe dans la course à l'ordinateur quantique

Les années 2010 ont connu une nette accélération de la concurrence mondiale autour des technologies quantiques de traitement de l'information. À titre d'illustration, tandis que le ministère britannique de la Défense jugeait en 2014 que le domaine du traitement de l'information quantique était « trop immature » pour une application à court terme en défense et en sécurité, l'agence britannique Defence Science and Technology Laboratory (DSTL) rapportait en juin 2020 que « le progrès atteint à l'échelle nationale comme mondiale avait dépassé les estimations initiales », si bien que, aujourd'hui, « beaucoup considèrent cet empressement à développer l'informatique quantique comme une nouvelle 'course à l'espace'¹²⁴ ».

S'il y a désormais une course à l'informatique quantique, c'est qu'être à la traîne présente des risques géopolitiques. Le risque principal concerne la cybersécurité, comme expliqué ci-dessus, puisque les ordinateurs quantiques seront capables de percer les procédés de cryptage actuels. Un autre risque concerne l'accès aux technologies¹²⁵. La cryptographie quantique et les ordinateurs quantiques ont en effet rejoint la liste des biens défensifs et stratégiques, et font donc désormais l'objet de restrictions d'exportation¹²⁶. Les technologies habilitantes nécessaires pour faire fonctionner des ordinateurs quantiques peuvent aussi être placées sous contrôle : certains qubits requièrent des températures extrêmement basses, obtenues grâce à des cryostats, dont les États-Unis envisagent d'interdire l'exportation vers la Chine¹²⁷.

La concurrence sino-américaine et les technologies quantiques

Actuellement, les pays les plus avancés dans le domaine de l'informatique quantique, en termes technologiques et de stratégie et financement gouvernementaux, sont les États-Unis et la Chine – qui ont

124. A. Middleton *et al.*, « Quantum Information Processing Landscape 2020 », *op. cit.*, p. i.

125. Decode Quantum, « À la rencontre de Neil Abroug, coordinateur de la stratégie quantique nationale française », Épisode de podcast, mai 2021, disponible sur : www.spreaker.com.

126. G. Brennen *et al.*, « An Australian Strategy for the Quantum Revolution », *op. cit.*, p. 14. La cryptographie quantique figure déjà sur la liste des éléments soumis à contrôle aux États-Unis et dans l'UE. En 2018, l'administration Trump a ajouté l'informatique et la détection quantiques à la liste des technologies qui devraient être soumises à contrôle.

127. Gouvernement, *Faire de la France une économie de rupture technologique*, 2020, p. 51 ; A. Alper, « U.S. Finalizing Rules to Limit Sensitive Tech Exports to China, Others », Reuters, 17 décembre 2019, disponible sur : www.reuters.com.

déjà affirmé avoir atteint la suprématie quantique – ainsi que l'Europe (notamment le Royaume-Uni, l'Allemagne, la France et les Pays-Bas)¹²⁸.

Les États-Unis

L'inquiétude de Washington de se faire dépasser par la Chine a augmenté depuis que Pékin a démontré ses capacités dans le domaine des communications quantiques par satellite en 2017¹²⁹. En 2018, le président Donald Trump a lancé la National Quantum Initiative, avec 1,2 milliard de dollars (1 milliard d'euros) de fonds publics pour une période initiale de cinq ans, jusqu'en 2023¹³⁰. Trump a créé un bureau national de coordination quantique au sein même de la Maison-Blanche et, en août 2020, les États-Unis ont inauguré leurs centres nationaux de recherche quantique et 237 millions de dollars (200 millions d'euros) ont été ajoutés au budget 2021 à l'issue d'un vote¹³¹. Le projet de loi *United States Innovation and Competition Act* (USICA), voté par le Sénat au début du mois de juin 2021 et que devrait bientôt examiner la Chambre des représentants, propose d'allouer 150 milliards de dollars (128 milliards d'euros) entre 2022 et 2026 pour la recherche, l'innovation et l'éducation dans le domaine des technologies critiques et émergentes, dont les technologies quantiques. Comme suggéré plus haut, un autre axe de la stratégie américaine consiste à restreindre l'accès aux technologies aux rivaux des États-Unis, dont la Chine : en novembre 2021, le département américain du commerce a ajouté à la Liste d'entités huit groupes chinois impliqués dans l'informatique quantique, arguant que ces technologies pourraient être utilisées par les forces armées chinoises dans des applications de contre-furtivité, dans la lutte anti-sous-marine, et pour décrypter les communications américaines¹³².

En dehors du gouvernement, les grandes entreprises technologiques investissent de grosses sommes d'argent dans leurs propres programmes de recherche en science quantique – les chiffres de leurs investissements internes ne sont néanmoins pas divulgués¹³³.

128. De nouvelles stratégies et de nouveaux plans d'investissement se multiplient rapidement à travers le monde. Le Canada dispose aussi d'un important écosystème d'informatique quantique et est même leader dans la technologie du recuit quantique. Voir J. Kung et M. Fancy, « A Quantum Revolution: Report on Global Policies for Quantum Technology », CIFAR, avril 2021.

129. G. Brennen *et al.*, « An Australian Strategy for the Quantum Revolution », Australian Strategic Policy Institute, Rapport n° 43/2021, p. 14.

130. MIT Technology Review, « President Trump Has Signed a \$1.2 Billion Law to Boost US Quantum Tech », 22 décembre 2018, disponible sur : www.technologyreview.com.

131. C. Goujard, « Germany Unveils Powerful Quantum Computer to Keep Europe in Global Tech Race », Politico, 15 juin 2021.

132. D. Sevastopulo, « US Blacklists Chinese Quantum Computing Companies », *Financial Times*, 24 novembre 2021.

133. Dont IBM, Google, Alibaba, Hewlett Packard, Tencent, Baidu et Huawei. Voir E. Gibney, « Quantum Gold Rush », *op. cit.*

La puissance financière des investisseurs privés et l'attrait de grandes entreprises numériques comme IBM, Google et Intel ont donné une longueur d'avance à ces entreprises dans la recherche quantique. C'est IBM qui avait posé les premiers principes d'un ordinateur quantique et présenté le premier ordinateur à deux qubits. En 2016, l'entreprise était parvenue à simuler une structure moléculaire et avait atteint le seuil théorique de la suprématie quantique avec 50 qubits¹³⁴. L'année suivante, Intel inaugurerait un calculateur de 49 qubits et Google un processeur de 72 qubits. En septembre 2019, Google affirmait avoir atteint la suprématie quantique avec un ordinateur quantique de 53 qubits à l'aide de circuits supraconducteurs. Ce dernier avait réussi à résoudre en seulement trois minutes un calcul qui, selon Google, aurait pris 10 000 ans à un supercalculateur conventionnel¹³⁵. IBM a relativisé cette réussite en affirmant que ce calcul aurait été résolu en seulement deux jours et demi par le supercalculateur le plus puissant.

Depuis 2016, IBM a mis à disposition une interface en ligne de programmation quantique, IBM Quantum Experience. Cette plateforme fournit un simulateur de programmation quantique qui donne accès à 22 ordinateurs d'IBM. À ce jour, 325 000 utilisateurs se sont inscrits et 700 articles tirés d'un travail effectué avec cette machine ont été publiés¹³⁶. Hormis IBM, d'autres entreprises américaines, comme Microsoft, Amazon et Rigetti, ainsi que le Canadien Canada, offrent des services en ligne de puces de calcul quantique à petite échelle, avec des capacités allant jusqu'à 65 qubits¹³⁷. En ce qui concerne les machines sur site, les entreprises américaines, IBM la première, ont déjà construit et exporté des prototypes d'ordinateur quantique. La stratégie d'IBM est de rendre sa technologie accessible en ligne, afin d'encourager une adoption rapide de son produit¹³⁸. IBM a exporté son tout premier ordinateur quantique commercial (certes encore expérimental), le Quantum System One de 20 qubits, en Allemagne et au Japon, pour y mener de la R&D quantique. L'entreprise travaille aujourd'hui à créer un ordinateur quantique stable capable de supporter plus de 1 000 qubits d'ici 2023¹³⁹.

134. CIGREF, « Informatique quantique », *op. cit.*, p. 10.

135. J. Kung et M. Fancy, « A Quantum Revolution », *op. cit.*, p. 8.

136. IBM, « Five Years Ago Today, We Put the First Quantum Computer on the Cloud », *op. cit.*

137. G. Brennen *et al.*, « An Australian Strategy for the Quantum Revolution », p. 16.

138. Entretien avec Olivier Ezratty, Consultant, 6 avril 2021.

139. Deutsche Welle, « IBM Unveils First Quantum Computer in Germany », 15 juin 2021, disponible sur : www.dw.com.

La Chine

En Chine, des efforts sont menés sur le sujet depuis 2015. Les révélations de Snowden en 2013 ont suscité des inquiétudes quant à l'ampleur des services de renseignement américains et de leurs activités, et accru l'intérêt du gouvernement chinois pour les communications et l'informatique quantiques¹⁴⁰. Pékin a donc cherché à exploiter les réseaux quantiques pour sécuriser ses communications les plus sensibles¹⁴¹. Parallèlement au lancement du plan quantique d'Obama, Pékin a ajouté le domaine quantique aux priorités scientifiques et technologiques majeures à développer d'ici 2030. On dispose de peu d'information sur le financement total des technologies quantiques en Chine. Officiellement, la Chine a dépensé plus de 302 millions de dollars dans les sciences quantiques entre 2013 et 2015¹⁴². En 2017, Pékin a annoncé avoir investi 10 milliards de dollars dans un nouveau centre de recherche quantique. Si les estimations des véritables dépenses de la Chine dans la recherche quantique varient, le pays est leader en termes de brevets en communication quantique et en matériel et logiciel de cryptage¹⁴³.

De solides efforts de recherche ont mené à un progrès rapide et même au leadership dans la cryptographie et les communications quantiques, comme l'a montré en 2016 le lancement par la Chine du premier satellite de communication quantique au monde¹⁴⁴. En ce qui concerne les ordinateurs quantiques, les efforts de la Chine sont plus récents, mais Pékin a rapidement rattrapé son retard. En décembre 2020, un groupe de chercheurs de l'Université de sciences et technologie de Chine (USTC) a revendiqué de manière crédible avoir atteint la suprématie quantique au moyen d'un système photonique qui a permis de réaliser en 200 secondes un calcul qui aurait pris 2,5 milliards d'années à un supercalculateur classique¹⁴⁵. Ce qui signifie que le calcul a été effectué 100 mille milliards de fois plus vite qu'avec un supercalculateur classique. En juin 2021, la Chine a à nouveau démontré l'avantage quantique, cette fois grâce à un système fondé sur des circuits supraconducteurs.

140. E. B. Kania et J. K. Costello, « Quantum Hegemony? », *op. cit.*

141. *Ibid.* p. 13.

142. *Ibid.*

143. D. Garisto, « China Is Pulling Ahead in Global Quantum Race, New Studies Suggest », *Scientific American*, 15 juillet 2021, disponible sur : www.scientificamerican.com.

144. E. B. Kania et J. K. Costello, « Quantum Hegemony? », *op. cit.*

145. J. Kung et M. Fancy, « A Quantum Revolution », *op. cit.*, p. 8.

Europe : un écosystème quantique en croissance

Plusieurs pays à travers le monde ont développé, ou travaillent à concevoir, des stratégies et plans d'investissement pour construire leurs écosystèmes. Le Royaume-Uni, l'Allemagne et la France ont des capacités et des financements publics importants en recherche quantique, ainsi qu'un écosystème florissant de *start-ups*. Les Pays-Bas, l'Autriche et la Suisse disposent aussi de ressources de recherche et d'innovation importantes en calcul quantique, mais ils ne font pas l'objet d'une analyse détaillée dans cette étude¹⁴⁶.

Le Royaume-Uni

Le Royaume-Uni est l'un des principaux acteurs européens en technologies quantiques. En avril 2021, le directeur du Government Communications Headquarters (GCHQ) a suggéré que le Royaume-Uni devait développer ses « capacités souveraines » en informatique quantique, notamment pour répondre à la cybermenace que représente la Chine¹⁴⁷. Le pays ne part pas de zéro, loin de là. Le Royaume-Uni a lancé son programme national de technologies quantiques dès 2013. Le gouvernement prévoyait alors d'investir 400 millions de livres (467 millions d'euros) dans la première phase (2014-2019) et 350 millions de livres (400 millions d'euros) dans la seconde¹⁴⁸. En 2021, le gouvernement britannique a renouvelé son engagement dans les technologies quantiques et informatiques à travers une série de documents et de décisions stratégiques¹⁴⁹. *L'Integrated Review* de mars 2021 – le principal document d'orientation pour la politique étrangère, de sécurité et de défense du Royaume-Uni dans le contexte post-Brexit – accorde beaucoup d'importance à la puissance technologique et suggère que le Royaume-Uni devrait être leader dans le cyber, notamment dans les technologies quantiques et les nouvelles formes de transmission de données¹⁵⁰.

Comme aux États-Unis, de nouveaux centres de recherche et de nouvelles positions en matière de stratégie politique ont été établis. En juin 2021, Boris Johnson a annoncé qu'il allait créer un Conseil

146. En avril 2021, le Dutch National Growth Fund a alloué 615 millions d'euros à Quantum Delta NL, la fondation publique-privée qui exécute le programme national pour les technologies quantiques. Ce programme vise à former 2 000 chercheurs et ingénieurs et à offrir un tremplin à 100 *start-ups*. Le rapport de J. Kung et M. Fancy (« A Quantum Revolution », *op. cit.*) donne un bon aperçu des stratégies quantiques nationales à travers le monde.

147. « UK Spymaster Issues Warning Over China's Cyber Threat », *Financial Times*, 22 avril 2021.

148. J. Kung et M. Fancy, « A Quantum Revolution », *op. cit.*, p. 17.

149. B. Johnson, « We're Restoring Britain's Place as a Scientific Superpower », *Daily Telegraph*, 21 juin 2021.

150. HMG, *Global Britain in a Competitive Age: The Integrated Review of Security, Defence, Development and Foreign Policy*, 2021.

national de sciences et de technologie, dirigé par le Premier ministre, ainsi qu'un nouveau Bureau pour la stratégie scientifique et technologique, installé au Bureau du Cabinet, et un nouveau rôle de Conseiller technologique national¹⁵¹. Un nouveau centre national d'informatique quantique est en cours de création et verra le jour en 2023. En septembre 2020, le gouvernement britannique a conclu un accord de 10 millions de livres (11,7 millions d'euros) avec l'entreprise Rigetti, installée aux États-Unis, pour construire le premier ordinateur quantique britannique commercial¹⁵². Le Royaume-Uni dispose aussi d'entreprises locales. En juillet 2021, Oxford Quantum Circuits (OQC), une *start-up* britannique, a annoncé avoir lancé le premier service commercial britannique « d'informatique quantique en tant que service », construit entièrement avec sa propre technologie et mis à disposition sur un *cloud* privé¹⁵³. OQC n'a pas révélé combien de qubits sa machine contient, mais l'entreprise travaillait en 2017 sur un système de 9 qubits¹⁵⁴.

L'Allemagne

Le gouvernement allemand investit aussi dans les technologies quantiques. En juin 2020, un investissement de 2 milliards d'euros sur cinq ans a été annoncé, dans le cadre d'un effort de stimulation majeur¹⁵⁵, qui s'ajoute à un investissement initial du gouvernement de 650 millions d'euros pour la période 2018-2022. Il convient d'ajouter à cela la contribution des *Länder*, comme le récent investissement de 300 millions d'euros de la Bavière dans une « Quantum Valley ».

En juin 2021, la chancelière allemande Angela Merkel soulignait que le calcul quantique peut jouer un rôle essentiel dans la démarche visant à « acquérir la souveraineté technologique et numérique », alors que l'Allemagne et l'Europe se trouvent dans un contexte de « concurrence très intense¹⁵⁶. » Merkel souhaitait promouvoir le développement et la fabrication de technologies quantiques en Allemagne pour constituer un nouveau pilier industriel, en termes matériels et logiciels. Avant que cela n'arrive, la première étape a

151. Cabinet du Premier ministre, « Prime Minister Sets Out Plans to Realise and Maximise the Opportunities of Scientific and Technological Breakthroughs », Communiqué de presse, 21 juin 2021, disponible sur : www.gov.uk.

152. Department for Business, Energy & Industrial Strategy, « Government Backs UK's First Quantum Computer », Communiqué de presse, 2 septembre 2020, disponible sur : www.gov.uk.

153. M. Swayne, « OQC Delivers the UK's First Quantum Computing as-a-Service », *op. cit.*

154. R. Scammel, « 'Only Working Quantum Computer in UK' Now Accessible in the Cloud », *Verdict*, 7 juillet 2021, disponible sur : www.verdict.co.uk.

155. M. Swayne, « Qubit Alles: Germany Invest 2 Billion Euros in Quantum Technology, Build Two Quantum Computers' », *Quantum Daily*, 15 juin 2020, disponible sur : <https://thequantumdaily.com>.

156. C. Goujard, « Germany Unveils Powerful Quantum Computer », *op. cit.*

d'abord été de commander la construction d'au moins deux ordinateurs quantiques en Allemagne. La première machine a été inaugurée en juin 2021 à l'Institut de recherche appliquée de Fraunhofer, près de Stuttgart. Il s'agit d'un ordinateur Quantum System One d'IBM, le premier du genre en Europe. Cela permettra aux chercheurs allemands de travailler plus intensément sur de futures applications quantiques. Le choix d'une machine IBM (et le *cloud* qui va avec) a été justifié par le manque actuel d'entreprises quantiques européennes de pointe¹⁵⁷. Dans la première phase de sa stratégie en informatique quantique, l'Allemagne a favorisé le développement des usages des technologies quantiques davantage que le soutien aux entreprises nationales de matériel quantique.

La France

En février 2021, Emmanuel Macron a dévoilé un plan national pour les technologies quantiques visant à faire de la France le troisième pays au monde en termes d'investissement dans les technologies quantiques, derrière les États-Unis et l'Allemagne. Le plan français était en préparation depuis 2018, après que Thierry Breton, alors P.-D.G. d'Atos, a appelé le gouvernement français à élaborer une stratégie quantique. À l'époque, il était l'un des rares industriels français à faire entendre sa voix sur le sujet¹⁵⁸. Le ministère de l'Économie s'est emparé de la question et a sollicité un rapport parlementaire, qui a été suivi d'une feuille de route du gouvernement sur les technologies quantiques, élaborée au printemps 2020. Le plan français sur les technologies quantiques aurait dû être annoncé en 2020, mais a été reporté à cause de la pandémie de Covid-19 et a finalement été dévoilé en février 2021. Le plan prévoit un investissement public et privé total de 1,8 milliard d'euros (dont 1 milliard d'euros de financement public) entre 2021 et 2025, destiné à l'éducation et à la formation, à la recherche, au soutien de *start-ups* et au soutien du déploiement et de l'innovation industriels.

Avec cette stratégie, l'objectif de la France est de maîtriser des technologies quantiques décisives, dont les accélérateurs, les simulateurs et les ordinateurs quantiques, des logiciels commerciaux pour le calcul quantique, des capteurs et des systèmes de communication¹⁵⁹. La majeure partie du financement reviendra à l'informatique quantique, avec un total de 784 millions d'euros pour NISQ et LSQ.

157. *Ibid.*

158. Entretien avec Neil Abroug, Coordinateur national de la stratégie quantique, Secrétariat général pour l'investissement, 30 juin 2021.

159. Gouvernement, *Stratégie nationale sur les technologies quantiques*, 2021, p. 10.

Le choix de la technologie qubit à privilégier est fondé sur une analyse des probabilités de réussite d'une piste technologique donnée, la présence d'un nombre suffisant de chercheurs en France et d'un tissu industriel capable de construire ces technologies¹⁶⁰. À titre d'exemple, la technologie des ions piégés (développé par Honeywell, IonQ et AQT (Autriche), entre autres) est considérée comme très prometteuse, mais difficile à développer en France en raison d'un nombre insuffisant de chercheurs¹⁶¹. Dans le contexte d'un financement limité, l'objectif est de réduire petit à petit les risques, mais pour le moment, la France traite toutes les pistes technologiques de la même manière¹⁶².

Le Plan quantique 2021 tire des leçons des échecs passés en matière de planification gouvernementale, c'est-à-dire les gros investissements nationaux dans certains secteurs et infrastructures stratégiques¹⁶³. D'après Matthieu Landon, chargé de l'industrie au cabinet du Premier ministre français, l'une des leçons tirées est que ces stratégies d'État doivent être fondées sur des écosystèmes où la recherche et l'industrie sont déjà présentes, plutôt que sur un écosystème construit à partir de rien¹⁶⁴. L'écosystème quantique français est déjà riche. Il s'appuie sur des instituts de recherche (le CNRS, notamment l'université de Paris-Saclay, le CEA et l'Inria), ainsi que sur de grandes entreprises impliquées dans le développement des ordinateurs quantiques (Atos) et des télécommunications quantiques (Orange et Thales), ainsi que des technologies habilitantes utiles sur le plan quantique, comme la cryogénie (Air Liquide)¹⁶⁵.

Atos s'est engagé dans la simulation quantique et le test d'algorithmes pour de futurs ordinateurs quantiques. En 2017, l'entreprise a commencé à commercialiser la Quantum Learning Machine, un simulateur d'ordinateur quantique, capable de traiter jusqu'à 30 qubits en mémoire. Atos a fourni des simulateurs au laboratoire national d'Oak Ridge, qui fait partie du Département de l'Énergie américain, au laboratoire national d'Argonne aux États-Unis, au CEA et au Hartree Center, un laboratoire de recherche britannique.

Hormis ces grandes entreprises, la France a vu fleurir les *start-ups* quantiques ces dernières années. Parmi 260 *start-ups* et PME de technologie quantique estimées dans le monde, près de 10 % seraient

160. Entretien avec Neil Abroug, Coordinateur national de la stratégie quantique, Secrétariat général pour l'investissement, 30 juin 2021.

161. *Ibid.*

162. Neil Abroug dans le podcast Decode Quantum, « À la rencontre de Neil Abroug ».

163. Entretien avec Matthieu Landon, Conseiller technique Industrie, Recherche et Innovation, Cabinet du Premier ministre, 14 avril 2021.

164. *Ibid.*

165. Cryoconcept, une petite entreprise fondée en 2000 et née d'une scission d'une équipe du CEA, est spécialisée en cryogénie extrême. Elle a été rachetée par Air Liquide à l'automne 2020.

françaises¹⁶⁶. Pasqal est une entreprise de matériel quantique créée en 2019 et qui développe un ordinateur quantique fondé sur des atomes manipulés par des lasers, destiné à des centres de calcul HPC. Elle est soutenue par l'institut d'optique de l'université de Paris-Saclay. L'entreprise a pour le moment construit une machine quantique qui fonctionne sur site et a également reçu commande pour deux autres machines qui devraient être achevées au début de l'année 2023 au GENCI en France et au centre de recherche allemand à Jülich¹⁶⁷. La *start-up* s'est déjà engagée dans des partenariats avec Atos et le Crédit agricole¹⁶⁸. Pasqal a aussi décidé de mettre leur ordinateur à disposition sur un *cloud*¹⁶⁹.

Alice & Bob est une autre *start-up* prometteuse. Elle a été créée en février 2020 d'une scission d'une équipe ENS-Inria. Quelques mois plus tard, elle recevait 3 millions d'euros de la part des fonds d'investissement français Elaia Partners et Breega, et en octobre 2021 elle a été sélectionnée pour recevoir le soutien financier du Conseil européen de l'innovation *via* son accélérateur de *start-ups*¹⁷⁰. Le « qubit de chat » est une découverte fondamentale sur les qubits auto-correcteurs, qui a entraîné la création de la *start-up*. Celle-ci cherche à créer un ordinateur quantique exempt d'erreur, ou « idéal », « ce qui représente l'un des problèmes scientifiques fondamentaux qui a limité le développement d'une informatique quantique plus puissante¹⁷¹ ». La *start-up* prévoit de déployer dans le *cloud* le premier processeur quantique idéal au monde d'ici 2026¹⁷². Amazon cherche à développer un ordinateur quantique en s'appuyant sur cette même technologie, suite à la publication de travaux scientifiques sur les qubits auto-correcteurs¹⁷³. Si cela témoigne de la pertinence et de l'excellence de sa découverte, cela signifie également que la *start-up* française est désormais en compétition avec un géant du numérique, qui dispose

166. O. Ezratty, « Comprendre l'informatique quantique », *op. cit.*, p. 7.

167. « Notre armée mise sur la pépite de la quantique Pasqal, Parly salue des applications pour la défense 'hautement stratégiques' », *Capital*, 8 juin 2021, disponible sur : www.capital.fr.

168. I. Vergara, « Informatique quantique : les nouvelles ambitions du fonds Quantonation », *Le Figaro*, 3 mars 2021

169. K. Poireault, « EDF, Total, Airbus... Les grands industriels se lancent dans la programmation quantique », *L'Usine nouvelle*, 17 juin 2021, disponible sur : www.usinenouvelle.com.

170. S. Rolland, « Course à l'ordinateur quantique ».

171. M. Swayne, « Quantum Startup 'Alice&Bob' Raises \$3.3 Million for Plans to Build Error-free Quantum Computer », *The Quantum Daily*, 27 mai 2020, disponible sur : <https://thequantumdaily.com>; Commission européenne, « Le Conseil européen de l'innovation annonce une nouvelle vague de *start-ups* gagnantes », 14 octobre 2021, disponible sur : www.ec-europa.eu.

172. « Alice & Bob – Building an Ideal Quantum Computer », Vidéo, 12 juillet 2021, disponible sur : www.youtube.com.

173. P. Arrangoz-Arriola et E. Campbell, « Designing a Fault-Tolerant Quantum Computer Based on Schrödinger-Cat Qubits », *AWS Quantum Computing Blog*, 12 avril 2021, disponible sur : <https://aws.amazon.com>.

d'une marge de manœuvre financière incomparable et d'équipes scientifiques dix à vingt fois plus grandes que la sienne.

Des questions en suspens pour l'Europe

Collaborations internationales : quand la science devient technologie stratégique

La collaboration internationale joue un rôle central dans la recherche scientifique et elle est vitale en Europe pour atteindre une taille suffisante pour affronter la concurrence mondiale dans les technologies quantiques. Depuis 2018, l'UE a elle aussi fait de ces technologies une priorité et a investi un milliard d'euros pour co-financer des programmes collaboratifs de recherche sur dix ans. Le Quantum Flagship est l'une des plus grandes et des plus ambitieuses initiatives de recherche de l'UE. En fait, il s'agit actuellement du plus grand plan de financement collaboratif international dans les technologies quantiques¹⁷⁴. Il rassemble des instituts de recherche, le monde universitaire, l'industrie, des entreprises et des législateurs dans une initiative commune et collaborative à une échelle sans précédent. Parmi les programmes financés, figurent un ordinateur quantique (accélérateur) fondé sur des ions piégés (« AQTION », à l'université d'Innsbruck) et une plateforme de simulation quantique (« PASQuaS »), réalisée à l'institut Max Planck, à Munich. Sur le plan industriel, c'est Atos qui dirige les deux projets. L'UE finance aussi des projets dans d'autres technologies quantiques, notamment en communication quantique¹⁷⁵. Des collaborations bilatérales se développent aussi en Europe – en partie motivées par l'objectif d'obtenir des fonds de l'UE – comme l'illustre la signature fin août 2021 d'un protocole d'accord entre la France et les Pays-Bas pour la coopération universitaire, mais aussi pour construire des synergies entre les entreprises françaises et néerlandaises et faire émerger des licornes du quantique¹⁷⁶.

La transition des sciences quantiques depuis le domaine universitaire vers des applications concrètes dans la sécurité et l'industrie crée toutefois de nouveaux dilemmes pour les projets collaboratifs de l'UE et la coopération avec des États hors UE. Le Royaume-Uni, comme expliqué ci-dessus, mais aussi la Suisse et Israël

174. J. Kung et M. Fancy, « A Quantum Revolution », *op. cit.*, p. 13.

175. Commission européenne, « The European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI) Initiative », dernière modification le 23 juillet 2021, disponible sur : <https://digital-strategy.ec.europa.eu>.

176. Secrétariat d'État chargé de la Transition numérique et des Communications électroniques, « Stratégie quantique : protocole d'accord entre la France et les Pays-Bas sur les technologies quantiques », Communiqué de presse, 31 août 2021.

disposent d'écosystèmes de recherche quantique importants et souhaitent rejoindre les programmes européens d'Horizon Europe dans les domaines quantique et spatial. La Commission européenne, en particulier Thierry Breton, s'est opposée à la participation de plusieurs pays hors UE (dont le Royaume-Uni, la Suisse et Israël) aux programmes de recherche européens sur l'informatique quantique, soulignant que l'objectif était de « créer des capacités européennes indépendantes dans le développement et la production de technologies d'informatique quantique d'importance stratégique », avec des applications dans la sécurité et les technologies à double usage¹⁷⁷. Cependant, les communautés scientifiques et un groupe de pays de l'UE, mené par l'Allemagne, ont fait pression pour garder les programmes de recherche quantique et spatiale ouverts aux pays associés, affirmant que l'obligation de souveraineté technologique ne devait pas se faire aux dépens de la collaboration scientifique.

La course mondiale aux capitaux

S'il n'a pas encore atteint le volume et le poids d'autres industries, comme celle de l'intelligence artificielle, l'écosystème des entreprises de technologies quantiques, et notamment des *start-ups*, continue de croître à travers le monde. Selon certaines estimations, il y aurait plus de 260 *start-ups* et PME de technologies quantiques dans le monde¹⁷⁸. Beaucoup d'entre elles sont encore dans une phase de recherche appliquée et parfois même de recherche fondamentale, et l'informatique quantique reste un secteur technologique incertain¹⁷⁹.

Aujourd'hui, les investissements sont au cœur du problème. Comme suggéré ci-dessus, le financement est essentiel pour permettre aux chercheurs de réaliser des expériences, mais aussi pour développer et commercialiser des systèmes quantiques. En outre, si, comme mentionné ci-dessus, de futures restrictions de transferts de technologies quantiques inquiètent, les rachats d'entreprises florissantes par des capitaux étrangers, aussi. Si la France et l'Europe souhaitent conserver leurs talents et empêcher les individus et les *start-ups* prometteuses de s'exporter, les investissements du secteur privé sont nécessaires. Au niveau mondial, l'engagement du secteur privé dans le financement des *start-ups* du quantique a explosé : les entreprises d'informatique quantique ont touché 779,3 millions de

177. E. Kelly, « Viewpoint : EU Will Be 'Shooting Itself in Foot' If It Bars UK, Switzerland, Israel from Quantum and Space Projects », Science Business, 18 mars 2021, disponible sur : <https://sciencebusiness.net>. Au moment de la rédaction, le statut du Royaume-Uni était encore indéterminé.

178. O. Ezratty, « Comprendre l'informatique quantique », *op. cit.*, p. 7.

179. *Ibid.*

dollars (662 millions d'euros) pour 77 accords en 2020, contre 288,3 millions de dollars (194 millions d'euros) pour 69 accords en 2019¹⁸⁰. Plusieurs *start-ups* de technologies quantiques sont maintenant évaluées à plusieurs centaines de millions d'euros et au moins deux sont cotées en Bourse¹⁸¹.

L'explosion actuelle de l'investissement dans les *start-ups* du quantique fait pour l'instant le jeu de grosses entreprises du numérique et de fonds de capital-risque américains. L'entreprise canadienne Canada a, elle aussi, levé 100 millions de dollars (85 millions d'euros), financés en grande partie par des investisseurs américains, dont la branche d'investissement de la CIA, In-Q-Tel¹⁸². Au Royaume-Uni, la *start-up* PsiQuantum, qui compte parmi les leaders britanniques, a été créée en 2016 mais s'est depuis installée en Californie. Elle promet désormais de construire un ordinateur quantique universel à grande échelle d'un million de qubits d'ici 2025. Son départ pour la Silicon Valley a été en partie motivé par un besoin en capital¹⁸³. PsiQuantum a depuis réussi à recueillir au total 665 millions de dollars (565 millions d'euros), dont, à la fin du mois de juillet 2021, 450 millions de dollars (382 millions d'euros) principalement de la part d'investisseurs américains comme BlackRock et le fonds de capital-risque de Microsoft, M12¹⁸⁴. Cette histoire rappelle celle de DeepMind, l'entreprise britannique d'IA que Google a racheté en 2014 pour 400 millions de livres (628 millions d'euros)¹⁸⁵. Le gouvernement britannique est passé à l'action, en juillet 2021, en instaurant un nouveau fonds pour les entreprises à forte intensité de R&D, dont les entreprises du quantique. Pour y être éligibles, les entreprises doivent avoir obtenu des engagements de financement de la part d'investisseurs privés et/ou de fonds capital-risque¹⁸⁶.

Tous les pays qui se lancent dans la course quantique mais qui présentent un investissement privé limité risquent de connaître le même sort que les entreprises britanniques. C'est particulièrement

180. S. Castellanos, « Canada Lands \$100 Million as Investments Pour into Quantum Computing », *Wall Street Journal*, 25 mai 2021.

181. G. Brennen *et al.*, « An Australian Strategy for the Quantum Revolution », *op. cit.* p. 10.

182. Entretien avec Philippe Duluc, Directeur technique de la division Big Data et Sécurité, Atos, 12 juillet 2021.

183. « PsiQuantum Expects Commercial Quantum Computer by 2025 », *Financial Times*, 13 mars 2021.

184. Crunchbase, « PsiQuantum », non daté, disponible sur : www.crunchbase.com.

185. Chambre des communes, « Draft Enterprise Act 2002 (Share of Supply) (Amendment) Order 2020 », Débat parlementaire, 13 juillet 2020, disponible sur : <https://hansard.parliament.uk>.

186. M. Swayne, « Quantum Projects Could Get Boost from UK's £375 Million Plan to Drive Investment in Innovation », *The Quantum Daily*, 21 juillet 2021, disponible sur : <https://thequantumdaily.com>.

vrai en Europe, où le capital-risque est rare¹⁸⁷. Quantonation est un fonds d'investissement basé à Paris, le premier au monde à être spécialisé dans les technologies quantiques¹⁸⁸. Il a été créé fin 2018 et a financé Pasqal en 2019. Quantonation soutient les entreprises du quantique à leurs débuts, mais à terme, d'autres fonds d'investissement doivent prendre le relais et investir des centaines de millions pour aider ces entreprises en devenir à se développer. C'est précisément là qu'il existe un risque pour les entreprises européennes qui cherchent à commercialiser des produits. Il s'agit d'un défi majeur, pour s'assurer non seulement que les entreprises ne soient pas rachetées par des capitaux étrangers, mais aussi qu'elles puissent se développer en Europe.

187. À ce sujet, voir aussi K. Sahin et T. Barker, « Europe's Capacity to Act in the Global Tech Race Charting a Path for Europe in Times of Major Technological Disruption », DGAP, Rapport, n° 6, avril 2021.

188. Entretien avec Christophe Jurczak, Fondateur et associé, Quantonation, 13 juillet 2021.

Conclusion

La démocratisation du calcul haute performance et les nouveaux sommets atteints par la puissance de calcul conventionnelle, ainsi que l'émergence de technologies de rupture en informatique quantique, bouleversent les calculs des gouvernements, des chercheurs et des entreprises privées. Ces dernières trouvent de nouvelles manières d'utiliser le potentiel de l'analyse des données, les gouvernements développent des stratégies pour gagner en puissance technologique et assurer la sécurité de leurs systèmes numériques, tandis que les scientifiques peuvent espérer faire de nouvelles découvertes en médecine et dans la lutte contre le changement climatique. Le progrès technologique promet aussi de réduire de manière significative la consommation énergétique des ordinateurs, qui est devenue un véritable sujet de préoccupation avec l'augmentation de leur utilisation.

La distribution mondiale de la puissance de calcul est en train de changer. Tandis que les États-Unis ont longtemps dominé le secteur de l'informatique conventionnelle, notamment avec le rôle déterminant d'IBM, Lenovo, une société chinoise, est devenue la première entreprise HPC mondiale en termes de part de marché. Aujourd'hui, les États-Unis et la Chine sont au coude à coude dans la course à l'informatique quantique, avec d'énormes investissements et d'impressionnants accomplissements technologiques. Pour les retardataires, cela induit le risque de créer d'emblée des dépendances technologiques durables, en termes de matériels comme de logiciels.

Mais la révolution quantique actuelle favorise l'émergence d'une multitude d'acteurs, depuis les laboratoires de recherche jusqu'aux *start-ups* et fonds d'investissement, qui pourraient redistribuer davantage la puissance de calcul dans le monde. Les technologies qui s'accompagnent d'un faible niveau de commercialisation offrent à l'Europe une chance toute particulière de se positionner rapidement dans ce secteur émergent et de développer des capacités tout au long des chaînes de valeur de l'informatique quantique (matériel et logiciel). Les gouvernements européens, dont la France et l'Allemagne, ainsi que les institutions de l'UE ont fait des efforts considérables dans cette direction. Avec l'aide d'investisseurs privés, ils devront rester engagés tout au long du cycle de vie de cette technologie émergente au fort potentiel de rupture.



27 rue de la Procession 75740 Paris cedex 15 – France

Ifri.org