

A S S E M B L É E N A T I O N A L E

X V ^e L É G I S L A T U R E

Compte rendu

Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

- **Examen** du rapport présentant le bilan des 12 premières notes scientifiques de l'Office (Gérard Longuet, sénateur, et Cédric Villani, député, rapporteurs). 2
- **Examen** d'une première note scientifique sur les technologies quantiques (Cédric Villani, député, rapporteur). 8

Jeudi 28 mars 2019

Séance de 9 heures

Compte rendu n° 42

SESSION ORDINAIRE DE 2018-2019

**Présidence
de M. Gérard Longuet,
*président***



Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

Jeudi 28 mars 2019

- Présidence de M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office -

La réunion est ouverte à 9 h 15.

Examen du rapport présentant le bilan des douze premières notes scientifiques de l'Office (Gérard Longuet, sénateur, et Cédric Villani, député, rapporteurs).

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – Je vous prie d'excuser le retard de Cédric Villani qui va nous rejoindre dans quelques instants.

Je vais d'abord vous rappeler le contexte de la mise en place des notes scientifiques qui commencent à être connues.

Il est apparu qu'il fallait renouveler un peu les modes d'intervention de l'Office, après trente-cinq ans d'existence. Jusqu'à récemment, l'Office intervenait principalement sous deux formes : d'une part, de classiques rapports d'étude très approfondis portant sur des sujets larges, sur saisine des commissions permanentes ou du Bureau des assemblées ; d'autre part, des auditions publiques d'actualité introduites dans les années 2000.

En s'inspirant des meilleures pratiques des homologues européens chargés de l'évaluation technologique parlementaire et après une analyse comparée des travaux des autres membres du réseau de l'EPTA (*European Parliamentary Technology Assessment*), Cédric Villani a proposé de réaliser des notes scientifiques synthétiques sur des sujets d'actualité plus restreints, établies dans un délai court, d'un à trois mois, délai qui a été tenu et pour lequel je remercie les membres de l'Office qui l'ont assumé.

Ces notes ont un format standard de quatre pages, accompagnées d'annexes qui précisent les renvois à des références scientifiques et la liste des experts consultés, au premier rang desquels les membres du conseil scientifique de l'Office.

Nous suivons pour ces notes une méthodologie fondée sur la consultation de tous les acteurs, d'une manière comparable à celle d'une mission d'information parlementaire, mais enrichie d'une démarche contradictoire avec la soumission du projet de texte à l'ensemble des experts consultés (entre dix et vingt selon les sujets), et en recherchant systématiquement l'appui des Académies et des grands organismes de recherche.

Pour chaque sujet, nous avons désigné un ou plusieurs rapporteurs membres de l'Office. Ce choix diffère structurellement de la pratique des notes scientifiques du POST britannique (*Parliamentary Office of Science and Technology*), commun à la Chambre des Communes et à la Chambre des Lords, qui publie de telles notes depuis longtemps mais sans associer directement des parlementaires, ce qui est dommage. En tenant la plume, les parlementaires donnent une vision politique et surtout une crédibilité à ces notes auprès de leurs collègues que n'auraient pas les scientifiques seuls qui seraient facilement jugés trop technos ou compliqués. C'est un assez bon équilibre.

Nous avons commencé l'élaboration des premières notes à la fin 2017, et les premières notes scientifiques ont été publiées en mars 2018. Depuis un an, douze notes ont été produites et publiées.

Avec celle sur les technologies quantiques, cela fait même 13, mais restons-en à la publication d'ensemble des 12 premières, qui correspondent pour faire simple à une par mois en moyenne.

Sur le fond, ces notes ont concerné les thèmes principaux d'intervention de l'Office, seul le thème des sciences de la vie apparaissant un peu moins représenté : le numérique, avec les notes objets connectés, impression 3D, et blockchains ; la physique et l'énergie, avec les notes rénovation énergétique des bâtiments, stockage de l'électricité, et grands accélérateurs de particules ; l'environnement, avec les notes stockage du carbone dans les sols, enjeux sanitaires et environnementaux de l'huile de palme, et biodiversité : extinction ou effondrement ; l'espace, avec les notes sur Mars : nouvelle frontière de l'exploration spatiale, et les lanceurs spatiaux réutilisables ; les technologies des transports, avec une note sur le transport à hyper grande vitesse sous vide ; les sciences de la vie, avec une note sur les enjeux sanitaires et environnementaux de l'huile de palme.

Ces douze notes ont mobilisé plus de députés, 8 dont deux ont présenté deux notes chacun, et 5 sénateurs, soit 13 des 36 membres de l'Office.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – Les sénateurs n'ont pas été en reste pour l'énergie déployée dans la réalisation de ces notes !

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – La majorité des notes a été présentée par un seul membre de l'Office, une note l'a été par deux députés, une par trois membres (deux députés et un sénateur).

L'objectif est que ces documents soient aussi lisibles et pédagogiques que possible. En particulier, dans l'esprit des publications scientifiques, chaque note commence par un résumé synthétique soulignant les principaux enseignements sur le sujet. De même, les notes s'efforcent à chaque fois de préciser le contexte dans lequel elles s'inscrivent, et sont complétées par des notes de fin aussi détaillées que nécessaire.

Les notes font l'objet d'un examen collégial par l'Office, qui décide formellement d'autoriser leur publication. Cet examen a donné lieu à des débats approfondis au sein de l'Office. Nous n'avons jamais eu de vrai différend ; le caractère scientifique objectif l'emporte sur les convictions personnelles. Ensuite les notes sont publiées sur le site de chacune des deux assemblées et diffusées à tous les parlementaires, transmises aux présidents et secrétariats des commissions permanentes compétentes, aux ministres concernés, aux membres du conseil scientifique, aux organismes impliqués, aux médias, et leur publication est mentionnée sur les réseaux sociaux.

Par ailleurs, chaque note est accompagnée d'une courte vidéo de présentation par son rapporteur, réalisée par les services de l'assemblée de ce dernier, et diffusée sur le site de chaque assemblée.

Enfin, les notes sont traduites en anglais pour une diffusion élargie, les sujets traités dépassant en règle générale le seul monde francophone.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – Après un an, quelles sont les perspectives ?

Nous avons un beau travail derrière nous et un beau travail devant nous. Plusieurs notes sont en cours, sur les technologies quantiques, qui viendront en appui d'une mission d'information, et une note sur les vaccinations où l'enjeu est de présenter la bonne information de façon synthétique. D'autres notes sont demandées, sur les *smart cities*, sur la reconnaissance faciale, les services des satellites, les enjeux thérapeutiques du cannabis, les microplastiques ou encore sur neurosciences et psychiatrie. Les sujets ne manquent pas.

La diffusion de ces notes doit être aussi large que possible. J'ai évoqué tout à l'heure à la radio l'existence de ces notes, les journalistes présents m'ont fait part de leur intérêt pour ce type de travaux, ignorant que le Parlement avait une activité sur les questions scientifiques. Nous devons aussi travailler sur la diffusion auprès de nos collègues.

La publication de la « collection » de ces 12 notes dans un document prenant la forme d'un rapport parlementaire classique va dans ce sens ; c'est pourquoi nous proposons que les noms de tous les auteurs de l'une des notes apparaissent comme co-rapporteurs de ce rapport annuel, ce qui permettra de les indexer sur les sites internet des deux assemblées.

Au-delà, ces premières notes scientifiques posent la question de la nature et de la diversité du conseil scientifique et de l'évaluation technologique que les organes institutionnels d'une démocratie moderne peuvent légitimement attendre aujourd'hui, à l'heure où les technologies sont partout présentes, y compris dans la vie quotidienne.

L'organisation du conseil scientifique aux responsables politiques est un sujet qui mériterait une réflexion approfondie, incluant des comparaisons internationales avec des pays comparables.

Nous sommes en train d'organiser un colloque parlementaire sur le thème du conseil scientifique dans les démocraties modernes, mobilisant quelques scientifiques en chef de différents pays et organisations, comme Peter Gluckman de Nouvelle-Zélande ou Rémi Quirion du Québec. Peter Gluckman, grand spécialiste de cette question, a des anecdotes fantastiques à raconter, comme sa soudaine célébrité nationale pour avoir permis, par une simple mesure, d'économiser des centaines de millions à son pays. La date actuellement envisagée est celle du jeudi 19 septembre ; pour cette manifestation qui doit être bien visible et faire parler de l'Office, je souhaiterais y inviter, outre nos membres, tous les députés et sénateurs intéressés.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – La période semble bonne pour un sujet important, la rentrée politique sera déjà bien engagée.

Mme Catherine Procaccia, sénateur, vice-présidente de l'Office. – Je reviens sur la question du cannabis. Je ne suis pas sûre que ce soit un sujet pour l'Office. Les commissions des affaires sociales sont compétentes pour l'aspect santé et, au Sénat, une mission sur l'herboristerie en a récemment parlé et poursuit son travail sur ce sujet.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – Les choses évoluent à l'international. J'ai eu la surprise d'entendre il y a quelques jours mon collègue Jean-Michel Fauvergue, ancien patron du Raid, évoquer la question de la légalisation du

cannabis, au regard des expériences étrangères, avec toutefois un renforcement des peines pour les mineurs.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – J'ai une vraie inquiétude pour le cannabis car il me semble qu'il conforte l'endormissement intellectuel des jeunes générations. Mais l'aspect médical est intéressant pour l'Office.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – La dépénalisation et la légalisation relèvent bien sûr des commissions des lois mais l'impact médical c'est l'Office.

M. Bernard Jomier, sénateur. – La question des addictions dans notre société est importante. On assiste probablement à une hausse des comportements addictifs dans nos sociétés, même si on n'en est pas complètement sûr et qu'il n'y a pas d'accord sur le sujet. Se concentrer sur un produit entraîne certes une réduction sur ce produit, comme sur le tabac avec des politiques actives en ce sens, mais il y a des effets de basculement vers les autres produits. Au-delà des ressorts scientifiques biochimiques dans le cerveau, quels sont les ressorts scientifiques des comportements ? L'Office peut sans doute se pencher sur cette question.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – Cette observation permet d'aborder la question de l'ouverture de l'Office sur les sciences sociales, en particulier la sociologie et la psychologie. Ce sont des sujets qui me passionnent. Ils éclairent la politique mais ne la remplacent pas. La politique repose sur des valeurs, des convictions, des préférences. Mais par exemple on n'a jamais fait d'étude sociologique sur les conséquences de la loi Neuwirth, non pas sur un plan moral mais sur la société. Au-delà de tout jugement, la maîtrise facile de la contraception explique que nous sommes dans une société différente.

M. Jérôme Bignon, sénateur. – Dans la note que j'ai établie sur les pertes de biodiversité, il y a un éclairage sur les sciences sociales, avec des références à la psychologie sociale et comportementale. Il est mieux de ne pas avoir d'approche punitive. Il y a quelques jours, j'ai participé à un colloque très intéressant sur le *lifestyle*, les modes de vie, à l'IDDRI. La connaissance des modes de vie est importante pour aider les politiques à réfléchir, par exemple par rapport à l'obésité ou d'autres comportements, c'est le cœur des sciences humaines.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – L'impact des connaissances scientifiques, des découvertes, est en effet très important. La médecine accompagnait, elle ne soigne que depuis quelques dizaines d'années. L'attitude vis-à-vis de la vie et de la mort a donc beaucoup changé.

M. Bernard Jomier, sénateur. – J'en profite pour indiquer que je parraine l'organisation des Assises du deuil au Sénat. Beaucoup d'études scientifiques parlent de la mort mais elles sont méconnues. On parle de la fin de vie mais comment la société interagit avec la mort, on ne l'évoque presque pas et cela n'a pas de traduction politique.

Mme Émilie Cariou, députée. – Adeptes des travaux de Michel Crozier, je milite activement pour une plus grande prise en compte de la sociologie, notamment dans les travaux de la Cour des comptes. Pour étudier pourquoi un dispositif ne fonctionne pas, il faut absolument analyser ce qui se passe sur le terrain et connecter les lois à la réalité. Par exemple pour comprendre l'échec du plan de formation professionnelle de François Hollande, toutes

sortes d'aspects personnels et locaux doivent être analysés. Je suis tout à fait favorable à ce que l'on ait des études sociologiques beaucoup plus poussées.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – Cette intervention est tout à fait cohérente avec le souhait actuel de recruter un scientifique en sciences sociales pour accompagner les travaux de l'Office. Il y a d'ailleurs un mouvement actuel, peut-être plus à l'étranger qu'en France, pour ouvrir ces sciences à des sciences plus dures. Par exemple, le prix Nobel d'économie Daniel Kahneman a, dans un ouvrage devenu un bestseller, mélangé des considérations économiques assez dures avec des aspects psychologiques et montré l'impossibilité de comprendre certaines politiques économiques sans prendre en compte des considérations psychologiques.

Mme Émilie Cariou, députée. – Trente ans plus tard, les livres de Michel Crozier sont toujours d'actualité. Ces analyses pourraient aider à mieux comprendre les conflits sociaux.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – Il est important de mesurer les facteurs de stabilité et de mouvement. On paye très longtemps les choix. Par exemple, le passionné du franco-allemand que je suis observe que la primogéniture mâle des capétiens aboutit à un système centralisé alors que le système impérial est décentralisé, les familles se partageant les territoires avec un système politique éclaté. Inversement, l'État nation adossé au chemin de fer a des systèmes de communication assez simples. Avec le numérique, l'aéronautique et le container, c'est un système mondial remettant en cause l'État nation qui reste néanmoins un espace de liberté. L'État est mondial même si on ne peut choisir ce que font les Chinois et que malgré tout on le subit. Donc la technique et la société sont intimement liées.

Mme Laure Darcos, sénatrice. – Je trouverai que ce serait intéressant de travailler sur le génome humain mais je ne sais pas ce que l'Office a déjà fait dans ce domaine.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – C'est un thème passionnant que nous avons abordé récemment avec les Académies des sciences et de médecine.

Mme Catherine Procaccia, sénateur. – Nous avons rédigé il y a deux ans avec Jean-Yves Le Déaut, un rapport approfondi sur les nouvelles modifications du génome mais pas seulement le génome humain, également le génome végétal et le génome animal.

Mme Laure Darcos, sénatrice. – Dans le séquençage génétique, des progrès extraordinaires ont été accomplis. Une audition de Pierre Tambourin qui a créé le génopole serait intéressante. Une visite du génopole est même possible où l'industrialisation de quelques médicaments commence enfin.

Mme Catherine Procaccia, sénateur. – Sur les notes courtes, au-delà du plaisir de l'acquisition de connaissances pour les membres de l'Office, je trouve qu'on ne voit pas vraiment quel est leur impact. Les collègues parlementaires passent à côté et, pour les scientifiques, il s'agit d'une vulgarisation qui ne peut pas les intéresser. Les rapports longs ont au moins une incidence sur le monde scientifique. Il me paraît important de se poser la question de l'impact de ces notes.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – Il faudrait en effet faire plus d'efforts pour que les commissions et les groupes politiques les connaissent et le

président doit sans doute jouer un rôle plus actif. Par exemple, sur l'huile de palme, sujet politique et polémique, le travail d'Anne Genetet n'est pas contestable et aurait mérité d'être présenté devant plusieurs commissions.

Mme Angèle Prévile, sénatrice. – La vidéo faite sur la note sur le stockage de l'électricité a été mise sur twitter et a eu un certain impact. J'ai également largement distribué cette note dans mon groupe et elle devrait y donner lieu à un débat autour des questions d'énergie.

M. Bruno Sido, sénateur. – Ces notes scientifiques sont une très bonne chose car elles multiplient le travail de l'Office mais il faudrait en parler dans les groupes et en séance où cela peut intéresser certains de nos collègues.

Mme Laure Darcos, sénatrice. – Y a-t-il des amendements qui pourraient être portés en séance au nom de l'Office ?

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. – Les amendements doivent passer par les commissions, plutôt que par l'Office, sinon nous perdons notre indépendance.

Mme Catherine Procaccia, sénateur. – Il est important de parler des sujets de l'Office en séance publique. C'est aux membres de l'Office de faire leur promotion. Par exemple j'ai envoyé la note sur Mars à tous les membres des groupes aéronautique et espace à l'AN et au Sénat, en y associant la note de Jean-Luc Fugit sur les lanceurs spatiaux.

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. – Il faut certainement travailler sur l'impact, la communication, la promotion de ces notes.

L'Office autorise la publication du rapport présentant le bilan de ses douze premières notes scientifiques.

Examen d'une première note scientifique sur les technologies quantiques (Cédric Villani, député, rapporteur).

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. Mes chers collègues, c'est avec plaisir que je vous présente la note sur les technologies quantiques intitulée « Introduction et enjeux ». Cette note est la première d'une série consacrée aux différentes déclinaisons de ces technologies, dont elle constitue un préambule plus général.

Les investissements dans le domaine des technologies quantiques ont connu une expansion forte au cours des dernières années avec une course mondiale bien engagée dont les enjeux sont aussi bien scientifiques que stratégiques. Aux côtés de la course à l'intelligence artificielle ou des investissements dans les *blockchains*, la récente course aux technologies quantiques fait partie des grands enjeux qui pourraient permettre à certains pays d'occuper une place stratégique dans l'innovation, mais parfois aussi avec beaucoup de communication.

Rappelons tout d'abord que la physique quantique a été formalisée dans les années 1920 et a révolutionné notre conception du monde atomique. Elle est à l'origine de nouveaux principes tels que la quantification de l'énergie, qui fait référence aux « quanta » ou « paquets d'énergie » : par exemple, quand un atome passe d'un certain niveau d'excitation à un autre, une quantité d'énergie bien précise est émise ou reçue, ce qui est radicalement différent de la continuité de l'énergie que connaît la physique classique. Un photon émis lors d'un changement d'état d'excitation d'un atome a une fréquence précise, ou un multiple de cette fréquence. Un autre principe fondamental est la dualité onde-corpuscule : il faut penser un électron, un photon ou une autre particule fondamentale comme quelque chose qui est à la fois ponctuel et ondulatoire donc délocalisé. En conséquence, ce « quelque chose » n'a pas de position précise, mais seulement une probabilité de position. Par exemple, on peut illustrer ce comportement avec les expériences assez étonnantes dites « de Young », dans lesquelles des particules passent à travers des fentes et diffractent comme le ferait une onde. On peut citer aussi le principe de superposition d'états, selon lequel l'état d'une particule quantique est une combinaison linéaire de différents états, sans qu'on aille vraiment jusqu'à dire quelle est à la fois dans un état et dans un autre. De même, l'intrication quantique caractérise le fait que les états de deux particules peuvent être corrélés et liés intimement, même à très grande distance.

La France a joué un rôle important en physique quantique, avec des scientifiques français majeurs dans les années 1920 et 1930, notamment avec des personnalités comme Louis de Broglie, et plus récemment avec des théoriciens comme Serge Haroche ou Alain Aspect – le premier ayant déjà obtenu le prix Nobel, et tout le monde s'attendant à ce que le second le reçoive aussi un jour.

De nombreuses technologies, intégrées dans notre vie quotidienne depuis des décennies, utilisent déjà les grands principes de la physique quantique. Tel est le cas des lasers, dont on pensait, au moment de leur invention, qu'ils ne constituaient qu'une illustration des principes de la mécanique quantique « pour la beauté de l'art » et dont on s'est rendu compte après coup qu'ils pouvaient avoir toutes sortes d'usage. Tel est également le cas des transistors, ou encore des systèmes de localisation par satellite. Rétrospectivement, ces diverses applications ont marqué ce qu'il est convenu d'appeler la première révolution quantique.

Dans les années 1980 et 1990 sont nées par ailleurs les premières idées d'applications de la physique quantique en informatique, avec l'idée que certains calculs pourraient être très sensiblement accélérés en appliquant les principes de la physique quantique au cas des ordinateurs. En particulier, le principe de superposition permettrait d'effectuer une sorte de calcul parallèle, le parallélisme étant assuré ici par les lois de la physique. À l'époque que j'évoquais à l'instant, il existait cependant encore de nombreux verrous technologiques : on se demandait en particulier quels algorithmes on pourrait utiliser, sous réserve de disposer du bon équipement physique. Un pavé dans la mare a été lancé par le théoricien Shor avec son fameux « algorithme de Shor » montrant que, avec un ordinateur reposant sur les principes de la physique quantique, on pouvait résoudre le célèbre problème de la factorisation d'un grand nombre en facteurs premiers à une vitesse considérablement plus rapide qu'avec un ordinateur classique. Très vite a alors émergé l'idée que cette technique pourrait « casser » la cryptographie existante, qui devrait alors se rabattre vers d'autres codes. Mais aussi l'idée que certains calculs absolument infaisables avec les ordinateurs modernes, même de haute performance, pourraient être effectués par des ordinateurs quantiques.

En parallèle, la demande en puissance de calcul n'a cessé de croître et a pu être satisfaite grâce à des supercalculateurs de plus en plus sophistiqués et à la fameuse « loi de Moore ». Celle-ci « prédit » une augmentation exponentielle de la densité de transistors, et indirectement une augmentation exponentielle de la capacité de calcul. Mais nous sommes sur le point d'arriver à un plateau pour cette loi de Moore avec les technologies classiques : pour certains indicateurs, elle n'est déjà plus vérifiée depuis quelques années et on se rend compte que si on veut poursuivre la croissance exponentielle de la performance en informatique, si on veut dépasser les freins techniques et limiter la consommation électrique et les coûts qui augmentent très vite, une rupture technologique s'impose. Pour l'instant, l'idée d'ordinateurs fondés sur les technologies quantiques semble la plus prometteuse, même si une grande incertitude demeure quant à l'horizon de temps auquel ces ordinateurs sont susceptibles d'être disponibles. C'est un sujet pour lequel, compte tenu des enjeux, de très forts investissements industriels privés et étatiques se concentrent en Europe, aux États-Unis ou encore en Asie. On parle maintenant de deuxième révolution quantique : une révolution quantique qui ne porte plus seulement sur les lois de la physique mais aussi sur le rapport avec l'informatique et l'information, et qui trouve différentes applications, par exemple :

- le calcul quantique, avec la possibilité de réaliser certains calculs avec une puissance et une vitesse démultipliées ;
- la simulation quantique, pour reproduire de manière formalisée des interactions quantiques entre atomes au sein de molécules ou de cristaux, avec l'idée que ces interactions, extrêmement complexes et reposant sur une très grande combinatoire, pourraient précisément être décrites par les possibilités offertes par les lois de la mécanique quantique ;
- les communications pour échanger de l'information via des protocoles et des supports quantiques ultra-sécurisés avec une idée simple : si vous arrivez à produire une paire de particules intriquées et dans un état quantique déterminé, en transmettant ces particules par des systèmes de câblage adéquat, à deux endroits différents et éventuellement très éloignés, vous disposez alors de récepteurs qui ont exactement la même information. Si un tiers ou un espion a intercepté l'information au passage, l'information est automatiquement modifiée et vous vous en rendez compte. C'est assez impressionnant de se dire qu'avec les lois de

la mécanique quantique, on peut mettre au point un algorithme mathématiquement démontré comme « incassable ». Évidemment, cela n'empêchera pas les espions de recourir à d'autres techniques, plus humaines : Mata Hari va devoir reprendre du service !

- et enfin les capteurs quantiques, dont la précision est au niveau de l'atome et permet des applications industrielles et en recherche fondamentale non négligeables.

Comme toujours, on évoque des investissements considérables aux États-Unis, qui se sont dans un premier temps appuyés sur leurs industriels comme Microsoft, IBM ou Intel, mais qui commencent à investir au niveau fédéral, avec un plan d'un milliard de dollars sur cinq ans. Pour ces grands programmes, il faut toujours garder à l'esprit qu'ils incluent une part importante de pure communication et une autre de vrais investissements très sérieux. En Chine, les montants évoqués se comptent en milliards, en tête des budgets d'investissement en la matière. Enfin, en Europe, a été construit un programme d'investissement de type *flagship* ou « futures technologies émergentes », d'un montant d'un milliard d'euros sur 10 ans. Le montage et la mise en place de ce programme doivent beaucoup au travail de notre collègue Alain Aspect, qui est membre de notre conseil scientifique. Notons aussi un programme lancé par Atos sur la simulation quantique, avec l'idée que, même sans construire un ordinateur quantique, il serait déjà utile de développer les outils pour simuler le fonctionnement d'un tel ordinateur quantique dans le *cloud* et de le mettre à disposition des chercheurs, des industries qui veulent anticiper et s'approprier le sujet. Il faut aussi souligner qu'un certain nombre de start-up issues de la recherche émergent en France. Par ailleurs, des programmes de financement nationaux complémentaires voient le jour en Allemagne, au Royaume-Uni, aux Pays-Bas, ... avec, à chaque fois, des centaines de millions d'euros. Si on fait le total, on voit que, malgré notre bonne école historique de recherche en physique quantique et certains grands noms et prix Nobel récents en la matière, nos investissements restent limités par rapport aux enjeux. Il y a lieu de signaler également que la France héberge de grands programmes étrangers : par exemple, en décembre 2018, IBM a inauguré un pôle d'excellence mondiale centré sur le calcul quantique à Montpellier. Cela conduit à se poser la question suivante : comment être fiers de notre capacité à attirer des investissements étrangers dans ces domaines de technologie par la qualité de notre formation et, en même temps, limiter le « siphonnage » de nos talents passant systématiquement de la sphère publique vers la sphère des grands acteurs privés ?

Voilà, mes chers collègues, le panorama général que je souhaitais dresser à ce stade : dans d'autres notes scientifiques à venir, nous développerons l'aspect informatique puis le versant cryptographie, en présentant, à chaque fois, les tendances mondiales face aux forces et aux faiblesses de la France. Dans cette perspective, nous avons prévu de visiter un pôle de recherche à Grenoble, sur la partie physique fondamentale, connu comme étant au plus haut niveau international. Pour préparer cette note, nous avons mobilisé un nombre important de spécialistes, énumérés dans la liste des experts consultés : physiciens de haut niveau, directeurs de recherches, mais également journalistes vulgarisateurs qui font un travail de veille approfondi. La note cite également quelques ouvrages récents de très bonne facture, comme celui d'Olivier Ezratty ou la revue « Révolutions quantiques », publiée par le CEA en 2018.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. À Grenoble, s'agit-il du LETI ?

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. Tout à fait. Le LETI semble être une véritable pépite en la matière, notamment avec l'équipe de Maud Vinet et certaines collaborations en cours de mise en place.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. J'ai eu la responsabilité, en tant que ministre chargé de La Poste et des télécommunications, d'inaugurer ce laboratoire dans les années quatre-vingt, il travaillait alors sur les microprocesseurs et autres composants de microélectronique. On évoquait déjà à cette époque l'arrivée inéluctable aux limites de la loi de Moore, à des échelles du niveau de l'atome. Ai-je bien compris, de la présentation de la note qui vient d'être faite, qu'un monde nouveau est en train de s'ouvrir, porteur de solutions, mais aujourd'hui encore virtuel ?

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. L'ordinateur quantique aujourd'hui n'est pas une réalité. Il demeure des verrous technologiques. Certes, il existe bien des ordinateurs qu'on qualifie de « quantiques », dénommés D-Wave, mais il ne s'agit pas vraiment de technologie quantique au sens où je l'ai présenté succinctement à l'instant, même si cette autre approche fait intervenir également la physique quantique.

On peut anticiper que ces ordinateurs ne viendront pas remplacer les ordinateurs actuels, mais plutôt s'adjoindre à eux pour réaliser des opérations particulièrement complexes, dans des cas où la combinatoire joue un rôle important, de la même manière, et sans que l'on s'en rende forcément compte, que les processeurs graphiques, les GPU issus de l'industrie du jeu, et les ordinateurs basés sur ces GPU, sont venus s'inclure dans les architectures traditionnelles dans les grands centres de calcul, notamment pour mobiliser leurs performances pour les réseaux de neurones. L'ingénieur système du futur sera d'ailleurs probablement constitué d'une combinaison d'ingénieurs système habitués à travailler sur plusieurs architectures physiques différentes en fonction des besoins, avec une coordination de ces différentes architectures.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. Quand l'excellent Thierry Breton me dit qu'Atos dispose de son ordinateur quantique, c'est donc une information à considérer avec recul ?

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. Il fait un raccourci dans la course à l'ordinateur quantique, en réalité il s'agit d'un simulateur d'ordinateur quantique. Ce qui est déjà une belle réussite, avec des experts très compétents.

Mme Émilie Cariou, députée. Merci, cher Cédric, de nous éclairer sur ces domaines complexes, qu'on n'imagine même pas. Je comprends de cet exposé qu'un programme européen ambitieux a été lancé – et pense personnellement que le niveau européen est le bon dans un tel domaine –, mais ont aussi été cités des programmes nationaux, y compris en Europe, et je n'ai pas l'impression qu'en France, on en soit vraiment au même niveau ? Qu'en penser ?

M. Cédric Villani, député, premier vice-président de l'Office. Oui, on est en effet très en dessous en France. Le *flagship* européen va bien distribuer des financements, mais on est effectivement sous le niveau d'ambition qu'on pourrait imaginer pour de tels enjeux. Certes Atos est présent sur la partie informatique, et, dans le domaine de la physique plus fondamentale, nous avons des chercheurs très performants, mais il reste que nous pourrions faire beaucoup mieux. Je suis désolé de devoir vous quitter maintenant.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. Je pense que personne ne s'opposera à ce que nous autorisions la publication de cette note scientifique, qu'il ne sera pas évident à un autre qu'à son auteur de présenter aux médias tant le sujet est compliqué !

Personnellement, j'ai bien noté le problème préoccupant du « siphonnage », à la fois de nature politique et sociétale. D'un côté, la France peut être fière d'avoir des chercheurs au plus haut niveau, et de l'autre, il est évident que l'on met ainsi à la disposition d'un groupe mondial, dont les moyens sont quasi-illimités, des savoir-faire et des compétences qui leur coûtent plutôt moins cher que dans leur pays d'origine – les États-Unis –, alors que les résultats des recherches, les découvertes, les innovations seront appropriés par ces entreprises internationales. En même temps, ne pas avoir ces centres de recherche sur notre territoire aurait pour effet d'empêcher de donner à de jeunes chercheurs français la possibilité de commencer une carrière au meilleur niveau.

En tout cas, si la note présente bien les enjeux scientifiques, elle conduit à se poser la question de ce que pourrait être une stratégie pertinente, une politique scientifique, voire industrielle, pour la France et pour l'Europe, ou à suggérer aux commissions compétentes, sans doute les commissions des affaires économiques des deux assemblées, de se saisir du sujet.

S'agissant du montant des investissements, il faut intégrer le fait que l'accumulation de décennies d'expérience peut permettre de réduire substantiellement les coûts de la recherche. On peut arriver à des résultats comparables en mettant parfois cinq fois moins que les Américains. Ainsi, les dirigeants d'Eurocopter, entreprise européenne, nous avaient expliqué que le coût de développement d'un appareil en France y était inférieur d'un facteur presque dix.

Bien sûr, dans le cadre de la mondialisation de la recherche, la Chine et les États-Unis sont en mesure de « mettre des milliards sur la table ». Mais on peut gérer avec pertinence des moyens moindres, en s'appuyant sur un socle de recherche et peut-être de méthodologies moins onéreuses, mais qui parviennent néanmoins à des résultats solides puisque les prix Nobel sont au rendez-vous.

Je retiens en tout cas de ce sujet que les technologies quantiques ne remplaceront pas les ordinateurs classiques de la même manière que le moteur électrique a remplacé la machine à vapeur, mais qu'elles permettront des avancées importantes et des recherches innovantes. Est-ce qu'il ne nous appartient pas, dans un tel cas, de saisir les commissions permanentes et, plus généralement, nos assemblées respectives, de la question de la politique à définir ?

Mme Émilie Cariou, députée. L'importance du sujet et des montants pourrait même justifier un débat en séance publique.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. Il nous est toujours loisible de demander un débat dans nos assemblées respectives pour un échange avec le Gouvernement, même s'il faut conserver à l'esprit que, sur un sujet d'une telle complexité, les parlementaires ne seront pas nombreux à se sentir en mesure d'exprimer un point de vue personnel.

Mme Laure Darcos, sénatrice. J'ai rencontré hier des chercheurs du Génomètre qui m'ont dit que même si l'on va, dans le domaine de la santé, vers le développement de flux de données très importantes pour la recherche, il demeure des freins réglementaires, avec une

surveillance très rigoureuse de la CNIL. Les technologies quantiques sont-elles de nature à permettre de sécuriser parfaitement ces transferts de données et à rassurer sur l'impossibilité de les détourner ?

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. Il faudra que nous interrogeons Cédric Villani sur ce point. Sur un autre sujet, il est certain que, en ce qui concerne les transistors, qui sont le support de toute la révolution numérique, on est arrivé à la taille la plus petite imaginable, et que, si l'on veut continuer à gagner en puissance de calcul avec une consommation et une taille acceptables, il faut changer de modèle. J'ai compris également que si nous parvenions à maîtriser ces technologies, ça coûterait certainement très cher. Toutefois, dans l'investissement technologique, si être en retard est une erreur, financer trop tôt peut aussi parfois être critiquable *a posteriori*. Il faut investir et développer au bon moment !

Mme Émilie Cariou, députée. Les enjeux de ces technologies peuvent être de souveraineté, avec la maîtrise de technologies clefs. Si la question est de savoir quand et combien d'argent public il faudrait investir, je constate que l'Europe intervient mais aussi certains États, dans des volumes financiers élevés, et il me semble que certaines recherches fondamentales devraient être stimulées par les acteurs publics.

M. Bruno Sido, sénateur. Il faut non seulement savoir ne pas investir trop tôt, mais aussi le faire à bon escient. Prenons le cas du nucléaire : beaucoup d'argent a été dépensé pour étudier certaines filières, finalement abandonnées, comme l'eau lourde, la filière graphite-gaz, alors qu'aujourd'hui, on privilégie la filière des neutrons rapides, sans d'ailleurs avoir encore abouti. Dans ce domaine du quantique, puisque tous les acteurs bluffent sur leurs résultats, personne ne sait exactement où on en est, et il est donc singulièrement difficile d'investir !

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. Les écarts à la proportionnalité entre les sommes dépensées dans la recherche scientifique et les résultats obtenus peuvent être spectaculaires. Dans le domaine des recherches sur le génome, la France doit être dans des rapports de budgets de un à dix, voire vingt par rapport à ceux qui dépensent le plus, pour autant nous obtenons bien plus que le vingtième de ce qu'ils obtiennent. De même, dans le domaine des équipements de Défense, qui m'est plus familier, les États-Unis sont en avance dans certains secteurs par rapport à un pays européen comme la France, mais pas en proportion de leurs investissements. Il y aurait peut-être un travail intéressant pour notre Office parlementaire, consistant à comparer les budgets de recherche et les résultats qu'ils permettent d'obtenir réellement.

M. Bruno Sido, sénateur. Bien souvent aux États-Unis, les budgets de recherche tendent à soutenir les entreprises au-delà de leurs seuls travaux de recherche.

M. Gérard Longuet, sénateur, président de l'Office. Il est certain que certaines entreprises américaines du domaine de l'armement bénéficient de crédits de recherche très élevés en provenance du département de la Défense, qui permettent aussi d'équilibrer leur compte d'exploitation.

Je vous propose de réévoquer ce sujet à l'occasion d'une prochaine réunion de l'Office, en présence de Cédric Villani. Nous pourrions ainsi essayer d'expliquer ensuite à nos collègues parlementaires pourquoi il ne faut pas considérer qu'il y aurait des « falaises » financières insurmontables, puisque, avec beaucoup moins, on peut parfois atteindre des résultats relativement proches.

L'Office autorise la publication de la note scientifique n° 13 : Les technologies quantiques : introduction et enjeux.

La réunion est close à 10 h 30.

Membres présents ou excusés

Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

Réunion du jeudi 28 mars 2019 à 9 heures

Députés

Présents. - Mme Émilie Cariou, Mme Valéria Faure-Muntian, M. Cédric Villani

Excusés. - M. Christophe Bouillon, M. Pierre Henriot, M. Antoine Herth

Sénateurs

Présents. - M. Jérôme Bignon, Mme Laure Darcos, M. Bernard Jomier, M. Gérard Longuet, Mme Angèle Prévile, Mme Catherine Procaccia, M. Bruno Sido

Excusés. - M. Roland Courteau, M. Jean-Marie Janssens, Mme Florence Lassarade, M. Pierre Médevielle