

A S S E M B L É E N A T I O N A L E

1 7 ^e L É G I S L A T U R E

Compte rendu

Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

- **Présentation** de trois rapports récents de l'Académie des technologies sur : les PFAS par M. Patrick Maestro ; l'ordinateur quantique par M. Thierry Bonhomme ; la biomasse dans la transition énergétique par M. Dominique Vignon2
- **Désignation** de membres de la Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs (CNE2)26

Jeudi 16 avril 2026

Séance de 9 heures 30

Compte rendu n° 228

SESSION ORDINAIRE DE 2025-2026

**Présidence
de M. Stéphane
Piednoir,
*président***



Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

Jeudi 16 avril 2026

– Présidence de M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office –

La réunion est ouverte à 9 h 35.

Présentation de trois rapports récents de l'Académie des technologies sur : les PFAS par M. Patrick Maestro ; l'ordinateur quantique par M. Thierry Bonhomme ; la biomasse dans la transition énergétique par M. Dominique Vignon

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office. – Mes chers collègues, je vous remercie de votre présence et souhaite la bienvenue à ceux qui nous accompagnent ce matin pour une audition de l'Académie des technologies. Plusieurs de ses membres vont nous présenter trois rapports récents que nous avons sélectionnés.

Les thématiques retenues sont les PFAS, l'ordinateur quantique – qui a occupé l'Office pendant quelque temps – et la biomasse dans la transition énergétique.

Je voudrais souligner que cette réunion est une première avec l'Académie des technologies. Bien sûr, dans le cadre de leurs travaux, les rapporteurs de l'Office sollicitent en priorité les membres de l'Académie des technologies pour leurs auditions. C'est cependant la première fois que nous organisons une réunion sous ce format, et je m'en réjouis, car l'expertise des 390 membres de cette académie, au carrefour de la science, de la technologie et du monde économique, est une ressource précieuse pour nos travaux.

Je me suis entretenu il y a quelques jours avec la nouvelle présidente de l'Académie des technologies, Manoëlle Lepoutre, qui ne pouvait être présente ce matin et m'a demandé de l'excuser. Nous sommes convenus de resserrer les liens entre l'Office et l'Académie, notamment lorsque nous travaillerons sur les grandes transformations technologiques qui nécessitent l'éclairage d'experts.

Je rappelle également que quatre membres de l'Académie des technologies font partie de notre conseil scientifique.

Je précise que l'audition de ce matin fait l'objet d'une captation vidéo et qu'elle est diffusée en direct sur le site internet du Sénat, puis sera disponible en différé sur les sites de l'Assemblée nationale et du Sénat.

Nous allons consacrer environ quarante-cinq minutes à chacun des trois sujets, en abordant successivement les PFAS, l'ordinateur quantique et la biomasse dans la transition énergétique.

Patrick Maestro va présenter le premier rapport de l'Académie. Vous êtes chimiste dans le domaine des matériaux, lauréat de la médaille de l'innovation du CNRS en 2015, et vous avez été directeur scientifique de Rhodia et de Solvay.

Les usages industriels des PFAS se sont multipliés au cours des dernières décennies, alors que, parallèlement, la connaissance de leur toxicité et des risques qu'elles impliquent pour l'environnement s'est elle aussi renforcée. Aujourd'hui, l'on cherche à encadrer, voire à interdire l'utilisation de ce que l'on appelle parfois les « polluants éternels », pour réduire les risques qui leur sont liés.

Un plan interministériel PFAS 2023-2027 et une loi du 27 février 2025 ont commencé à définir un cadre protecteur pour la France. Il reste cependant à convaincre tous nos partenaires européens, et des débats sont en cours au Parlement européen sur ce sujet.

M. Patrick Maestro, membre de l'Académie des technologies, secrétaire général d'Euro-CASE. – Le rapport de l'Académie des technologies que je vais vous présenter est issu d'une saisine de la direction générale des entreprises. Nous avons ensuite jugé utile de partager plus largement ce rapport et ses recommandations. Ceci a nécessité une année supplémentaire, car nous avons mené de nombreux entretiens avec des scientifiques, des industriels et des personnes de la société civile afin de donner une vision technologique du problème des PFAS.

Quand une molécule polymérique comprend un groupe méthyle perfluoré (CF₃) ou un groupe méthylène perfluoré (CF₂) , on est en face d'une substance per- et polyfluoroalkylée (PFAS). Ce sont des matériaux aux propriétés exceptionnelles, liées à la très grande stabilité de la liaison carbone-fluor. Le fluor, très électronégatif, crée une liaison covalente d'une grande stabilité.

Cependant, il existe des différences de comportement très importantes au sein de la grande famille des PFAS entre les polymères de haute masse, qui sont quasi inertes, et les petites molécules, également stables mais solubles, volatiles ou toxiques. L'un des grands enjeux est donc de bien distinguer les polymères des petites molécules, car leurs impacts diffèrent considérablement. Les chimistes considèrent que c'est une masse d'environ 500 grammes par mole qui établit la ligne de séparation entre les petites molécules des polymères, la masse molaire de ces derniers pouvant atteindre plusieurs kilogrammes par mole.

Les polymères fluorés sont utilisés dans un grand nombre de secteurs de l'industrie et de notre vie quotidienne ; ils sont partout. Leur utilisation s'appuie sur des propriétés spécifiques, et leur substitution à performance identique est aujourd'hui très difficile.

Tous les PFAS, qu'il s'agisse de petites molécules ou de polymères, sont persistants dans l'environnement. C'est bien le sujet de notre discussion, car il n'existe pas de traitement par dégradation en raison de la grande stabilité de ces molécules. Plus de 10 000 composés PFAS sont identifiés aujourd'hui, qui diffèrent tous par leur état physique, leur structure chimique, leurs propriétés et leurs usages. Selon que l'on parle d'un polymère ou d'une petite molécule, il est raisonnable d'envisager différemment les approches réglementaires ou écotoxicologiques, car leur devenir est différent.

Il existe deux types de molécules : les petites molécules, où l'on trouve l'acide perfluorooctanoïque (PFOA) et l'acide perfluorooctane sulfonique (PFOS) dont la toxicité est avérée, et les fluoropolymères, très stables, pratiquement impossibles à détruire, mais qui sont très utilisés dans la vie quotidienne. Sachez que les polymères fluorés représentent environ 1 % de la masse totale de tous les polymères utilisés dans le monde, dont on connaît par exemple les polypropylènes, polyéthylènes et autres polymères de grande consommation. La

pollution par ces petites molécules est avérée et s'observe dans le monde entier, comme l'illustrent de nombreux documents du rapport. Les applications sont omniprésentes. Elles vont d'un usage essentiel, quasiment impossible à substituer dans l'état actuel des connaissances, à des usages que l'on peut dire « de praticité ». Par exemple, le polyfluorure de vinylidène (PVDF) est utilisé dans quasiment toutes les batteries au lithium comme séparateur ou liant, et aucune autre molécule n'assure aujourd'hui la même fonction, même si des études sont en cours. Il en va de même pour certains joints utilisés dans l'industrie. À l'inverse, d'autres usages sont de praticité : on peut accepter de perdre en performance en se passant de PFAS, comme dans les produits cosmétiques ou les peintures. Nous avons donc essayé d'examiner tout ceci en détail.

Voici quelques exemples de molécules et de leurs usages. Les petites molécules que vous voyez sur cette diapositive sont utilisées dans les matières actives pour l'agrochimie ou pour la pharmacie. Environ 30 % des produits actifs dans ces deux domaines comportent des molécules fluorées, en raison de la stabilité de la liaison carbone-fluor, de la lipophilie et de l'interaction avec la cible biologique. Ces molécules n'ont pas été choisies par hasard ; elles correspondent exactement à la fonction demandée. On les trouve dans un certain nombre de médicaments connus. Quant aux polymères, leurs applications sont à chaque fois liées à une propriété spécifique : résistance à la température, aux espèces chimiques ou à l'oxydation. Par exemple, les perfluoropolyéthers (PFPE) sont très utilisés dans des lubrifiants ou dans l'industrie des semi-conducteurs. Il y a toujours une réelle spécificité de l'utilisation de la molécule polymère dans le domaine concerné. Il existe une petite dizaine de types de polymères. Ils diffèrent les uns des autres par la longueur de la chaîne carbonée ou par les substitutions que l'on a faites sur celle-ci pour affiner une propriété donnée, qu'elle soit chimique, thermique ou mécanique. On joue donc avec ces quatre ou cinq gammes de polymères. S'agissant des fluoroélastomères, on peut considérer qu'ils ont des fonctions identiques à celles des silicones ou des néoprènes, mais bien meilleures. On les trouve dans des joints, des garnitures, des raccords ou des tuyaux, souvent dans le domaine industriel. De nombreuses usines ne peuvent pas fonctionner sans ces joints car leurs procédés reposent sur des réactions sous pression, à très haute température, ou sur l'emploi de réactifs complexes.

On emploie le PVDF comme séparateur dans les batteries, mais il existe bien d'autres applications. J'insiste sur la non-toxicité avérée de ces polymères. Ce sont des molécules très stables et, de ce fait, très difficiles à détruire en fin de vie. L'éthylène chlorotrifluoroéthylène (ECTFE) constitue une autre gamme de polymères fluorés utilisés pour fabriquer des protections contre la corrosion, des joints d'étanchéité ou des isolants électriques. J'insiste beaucoup sur ce point : il s'agit à chaque fois de bénéficier de propriétés très spécifiques que l'on ne trouve pas chez d'autres polymères. Le plus connu est le polytétrafluoroéthylène (PTFE), également connu sous la marque Téflon. Il possède des propriétés exceptionnelles en termes de résistance à la température, aux agressions chimiques ou aux UV. Le problème du PTFE, largement utilisé pour ses propriétés antiadhésives, hydrophobes, diélectriques et sa résistance chimique, est qu'il est inerte. Si vous déchirez une partie de votre poêle Téfal, vous obtiendrez un ruban de Téflon qui restera éternellement dans la nature et se désagrègera en microparticules. En outre, sa fabrication peut générer des résidus de synthèse. Si le PTFE est fabriqué à partir de petites molécules et que la réaction chimique est incomplète, le produit issu du procédé est un mélange entre le polymère fluoré et ces petites molécules. Cela devient dangereux, car celles-ci peuvent être séparées du polymère à l'usage et se disperser dans la nature. Il est donc très important de mettre en œuvre des procédés de fabrication respectueux de l'environnement, ce sur quoi les industriels ont travaillé récemment. Si le PTFE est dégradé à une température supérieure à 300 °C, dans une

atmosphère non contrôlée et oxydante, une émission de fluorure d'hydrogène (HF) est possible.

Mme Dominique Voynet, députée. – Vous dites « polymère » et « petite molécule », et non « polymère » et « monomère ». Les petites molécules sont-elles donc déjà des polymères ?

M. Patrick Maestro. – Les « petites molécules », comme les molécules actives pour la pharmacie ou les PFOA et PFOS, ne sont ni des polymères ni des monomères. Le monomère est déjà un peu plus gros qu'une petite molécule en termes de masse molaire.

Les monomères sont à la base de la synthèse des polymères et peuvent eux-mêmes contenir ces petites molécules. On a parfois besoin de petites molécules, souvent des tensioactifs, pour rendre compatibles une phase aqueuse et une phase huileuse. Ces tensioactifs peuvent être rejetés dans la nature s'ils sont utilisés dans la fabrication des polymères. C'est pourquoi les industriels abandonnent les procédés de synthèse en émulsion, qui utilisaient ces surfactants, au profit de procédés de synthèse en polymérisation radicalaire, une autre méthode qui n'utilise pas ces tensioactifs, mais des combinaisons de monomères.

Le Téflon est totalement inerte et inoffensif du fait de sa structure moléculaire. Cependant, s'il est mal traité en fin de vie, par exemple si de grandes quantités sont traitées dans un incinérateur – qui n'est pas sous atmosphère contrôlée –, il peut y avoir un relargage de HF ou d'autres « petites molécules sympathiques », comme des composés perfluorés volatils. D'où l'importance du traitement en fin de vie.

Dans le document, vous trouverez un tableau important qui illustre les applications des polymères fluorés dans tous les domaines de l'industrie et les raisons de leur utilisation. On y voit les domaines d'application, qui couvrent toute notre vie quotidienne, et la nature des polymères fluorés utilisés.

Pourquoi utilise-t-on les polymères fluorés ? Sans PVDF, il n'y a pas de séparateur dans les batteries et donc pas de batterie au lithium. Dans l'électronique et les semi-conducteurs, nous y avons énormément recours pour des raisons de protection thermique ou chimique et de résistance mécanique. Une usine ne peut pas fonctionner si elle ne dispose pas de joints, de tuyaux et de raccords en polymère fluoré, en raison de la stabilité de ses propriétés chimiques. Le réacteur en Téflon est utilisé partout, que ce soit au laboratoire ou dans les usines, car c'est le matériau le plus inerte, bien plus qu'un réacteur émaillé ou en Hastelloy. Il en va de même pour les lubrifiants industriels : les plus faibles coefficients de friction sont obtenus avec les polymères fluorés. On en trouve vraiment partout. Dans le secteur pharmaceutique, ils entrent dans la composition de plus de 30 % des molécules actives des médicaments.

Le problème des PFAS est donc qu'il faut gérer la pollution possible tout au long du cycle de vie. Il faut éviter de fabriquer des polymères fluorés avec de petites molécules ou, si l'on en utilise, s'assurer qu'elles auront été traitées et séparées du polymère avant la mise sur le marché. Il faut également veiller à ne pas dégrader le polymère lors de la fabrication de l'objet – le joint, le tuyau ou la membrane –, pour éviter la production de déchets et le relargage dans la nature d'effluents non traités.

La situation devient beaucoup plus complexe en phase d'utilisation, car ces substances sont partout et il y a donc toujours un risque qu'elles soient mal utilisées ou soumises à des températures élevées conduisant à leur dégradation.

Enfin, le point le plus important est probablement la collecte de fin de vie et le recyclage, qui ne sont aujourd'hui pas du tout organisés – le recyclage ou la destruction, car comme ces produits sont très stables, il est très difficile de les recycler.

Pour recycler le polyéthylène, il existe des méthodes chimiques, physiques comme le broyage, ou même biologiques pour détruire le polymère et revenir au monomère. Pour les polymères fluorés, en revanche, il n'existe pas de procédé industriel de recyclage. Il faut donc les traiter et les détruire pour revenir au fluor élémentaire ou au fluorure de calcium, qui peut ensuite être réintroduit dans la synthèse du fluor. Il s'agit d'une boucle vertueuse en termes d'économie circulaire.

Nous proposons d'accélérer les solutions. Les polymères fluorés sont indispensables à la vie quotidienne, mais bien qu'inoffensifs en tant que tels, ils posent un certain nombre de problèmes. L'idéal est donc de s'en passer, ce qui suppose de trouver des solutions de remplacement. Des mesures de restriction sont en cours de définition, notamment en France. Cependant, si l'on restreint leur utilisation, de quelles solutions de remplacement disposons-nous pour assurer les mêmes fonctions ? Vous trouverez dans le rapport un tableau qui retrace, application par application et après en avoir discuté avec les spécialistes, les solutions envisageables pour la substitution des polymères fluorés et des PFAS, à fonction identique. J'en ai illustré quelques-uns. Pour l'aéronautique, nous avons discuté avec nos collègues du groupement des industries françaises aéronautiques et spatiales (Gifas). Les PFAS et les polymères fluorés sont omniprésents dans un avion. Cependant, le plus souvent, l'avionneur ignore qu'un polymère fluoré assure telle ou telle fonction, car il fait de l'assemblage. Il en va de même pour une voiture ou dans le domaine électronique. Les avionneurs s'efforcent aujourd'hui d'identifier la présence de chaque polymère dans les diverses parties de l'avion afin de déterminer son utilité et s'il est possible de le remplacer facilement sans mettre en péril l'appareil. Aujourd'hui, sans PFAS, un avion ne vole pas. Telle est la conclusion de notre discussion avec nos amis du Gifas. Il faut donc que la filière gère cette question.

En agrochimie, il n'y a pas de solution aujourd'hui pour s'en passer. Actuellement, aucun domaine dans lequel une molécule fluorée est utilisée ne dispose d'une alternative. En revanche, dans la cosmétique, on utilisait des tensioactifs fluorés dans des rouges à lèvres ou des crèmes. On peut considérer que l'on peut s'en passer. La performance sera différente, mais cela n'est pas vital. De même pour le fart sous les skis : si la vitesse diminue de deux kilomètres par heure, ce n'est pas très grave. Voilà donc des domaines pour lesquels on peut estimer que l'on peut se passer des PFAS, même si l'on perd en performance.

Dans les batteries au lithium aujourd'hui, il n'y a pas d'alternative au PVDF. Des études sont en cours, mais il faudra quelques années avant de mettre au point un procédé industriel. On pourrait évidemment considérer les autres batteries, comme celles au sodium ou au zinc, mais elles n'ont absolument pas les mêmes performances dans le secteur automobile, par exemple. Pour d'autres applications stationnaires, elles peuvent convenir. Il faut donc regarder au cas par cas.

Concernant les gaz réfrigérants, les fameux gaz fluorocarbonés, quelques solutions sont à l'étude. Mais la solution peut être plus risquée que celle que l'on utilise actuellement, car les molécules de remplacement peuvent être dangereuses elles aussi. Il faut donc s'assurer que la molécule de substitution ne pose pas plus de problèmes que la molécule substituée.

Les membranes de filtration en PVDF sont celles qui sont utilisées pour dépolluer les petites molécules fluorées dans les eaux. Aujourd'hui, il n'y a pas de meilleure solution pour dépolluer les PFAS dans les eaux usées.

Enfin, j'insiste : aujourd'hui, une usine ne peut pas fonctionner sans molécules fluorées. Remplacer le polymère fluoré par une molécule moins performante comporte des risques de pollution, d'explosion et de corrosion. Il faut donc traiter cette question au cas par cas, mais ce n'est absolument pas évident.

La mise au point de solutions industrielles de remplacement des PFAS prendra entre cinq et dix ans. Parfois, la recherche académique propose des solutions, mais il faut ensuite les développer au niveau industriel.

J'en viens aux recommandations. La première est qu'il faut communiquer clairement et ne pas mettre toutes les molécules fluorées dans le même panier. Il y a les molécules à toxicité avérée, comme les PFOA et PFOS, et il y a les polymères qui sont inertes s'ils sont traités correctement. Il faut donc communiquer sur la grande variété des molécules qui sont des PFAS et, pourquoi pas, adopter une nomenclature différente. Dans le cadre de l'Académie des technologies, je suis également secrétaire général d'Euro-CASE, le réseau des académies des technologies européennes. Nous discutons de ce sujet au niveau européen, avec des visions assez différentes. Le document de l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA) qui vient de paraître, d'environ 200 à 250 pages, fait le bilan des utilisations des PFAS, des dérogations possibles, et pose des questions. Les académies européennes vont y répondre et formuler des recommandations. Pour ce qui est du rapport de l'Académie des technologies, la première recommandation est donc de travailler sur une différenciation des molécules, avec par exemple une nomenclature par catégories – verte, orange et rouge – en fonction des toxicités avérées.

Il faut ensuite hiérarchiser les risques. Les substitutions sont parfois possibles, d'autres sont à l'étude. Il faut donc travailler sur les dérogations à accorder, en examinant le caractère indispensable ou non de la molécule PFAS pour une utilisation quotidienne.

Un point très important : l'industrie n'a pas été complètement transparente au cours des trente dernières années, voire au-delà, sur les rejets de molécules PFAS, et c'est ainsi que l'on en trouve un peu partout dans l'environnement. Aujourd'hui, les industriels européens ont pris conscience de ces enjeux et ont complètement revu leurs procédés de fabrication, qui sont contrôlés en France par les directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement (Dreal), afin d'éviter les rejets et d'être le plus vertueux possible. Il faut garantir la pureté des polymères fluorés et éviter les coproduits contenant les petites molécules, tant que nous n'aurons pas trouvé d'alternatives. Lorsque ces alternatives existeront, nous pourrons nous passer de ces polymères ou changer les technologies qui les utilisent aujourd'hui. Une fabrication sans émissions environnementales est nécessaire.

Parallèlement, il faut renforcer le contrôle des importations, car il serait vain d'être vertueux en France et en Europe si des produits qui le sont moins arrivent de l'étranger. La difficulté est de les identifier.

Autant que possible, il nous paraît très important de marquer, documenter et tracer la présence de polymères fluorés dans les équipements et produits finis. Une sorte de « PFAS Inside », pour que l'on sache que ce produit ne doit pas être traité n'importe comment en fin de vie. Face aux pollutions aqueuses existantes, il faut travailler sur le traitement des eaux. Des actions sont en cours et doivent être poursuivies pour éviter les rejets supplémentaires. Concernant les sols pollués, la situation est plus complexe mais il ne faut pas la laisser sans réponse. Enfin, il est indispensable de travailler sur la collecte, le tri et le traitement en fin de vie des objets contenant des molécules fluorées, car un mauvais traitement peut générer des pollutions. Pour cela, il faut soutenir la recherche et l'innovation.

J'ai passé quarante ans dans l'innovation industrielle, en partenariat très étroit avec le monde académique. Certaines solutions sont aujourd'hui des curiosités de laboratoire. Il faut faire attention à la communication qui est faite autour d'elles et s'attacher à les valider par leur capacité à devenir des solutions industrielles. Il faut pousser et renforcer la collaboration entre le monde académique et le monde industriel pour aller plus vite et mettre en place ces substitutions, qui ne sont pas forcément évidentes à court terme. En travaillant ensemble, nous pouvons accélérer la mise au point de certaines solutions en passant du laboratoire à la sphère industrielle.

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office. – Merci, Monsieur Maestro, pour ces rappels de chimie sur des liaisons qui sont très stables mais pas toujours inoffensives, si nous avons bien compris.

Merci également de pointer cette forme de dépendance de notre société aux PFAS. De nouveaux produits sont arrivés progressivement et ont été introduits dans l'ensemble des écosystèmes économiques, que ce soit l'industrie, l'automobile ou l'aéronautique, et nous peinons évidemment à nous en défaire, puisqu'ils sont essentiels dans le fonctionnement de nombreux procédés de fabrication.

M. Bruno Sido, sénateur. – Merci pour votre exposé. Vous connaissez bien ces PFAS, que l'on trouve un peu partout. On dit que ce sont des substances polluantes et dangereuses. En quoi ces molécules sont-elles dangereuses pour la santé humaine et quelles maladies provoquent-elles ?

M. Patrick Maestro. – Je ne suis pas spécialiste en santé humaine, mais la toxicité des petites molécules – les polyfluoroalkylsulfonates ou alcanates – est avérée, avec des impacts sur les cancers. Ce sont les petites molécules qui sont concernées, alors que les polymères sont totalement inertes.

Les médicaments ont été conçus pour être actifs. Il peut donc y avoir un effet secondaire, une toxicité adjointe, mais ils ont été créés pour agir sur une pathologie précise.

Ce qui est dangereux, ce sont les molécules encore plus petites, ces fameux PFOA et PFOS. Pour ceux-là, des maladies cancéreuses sont avérées lorsque l'on est exposé à des doses importantes, notamment par des pollutions de sol qui se diffusent aux aliments. Des cas sont cités dans le rapport.

J'espère avoir été clair : pour les petites molécules, la toxicité est avérée ; pour les plus grosses molécules, donc les polymères, il n'y a pas de toxicité avérée.

Mme Dominique Voynet, députée. – Je ne reviens pas sur les modalités de la toxicité pour l'homme, car de très nombreux travaux montrent, au-delà des cancers, des effets reprotoxiques et bien d'autres.

Je vis à côté d'une usine Solvay et j'ai participé à une analyse des polluants présents dans les cheveux. Presque toutes les personnes testées présentaient des quantités mesurables de PFOA. Les cheveux d'une personne qui travaillait sur la chaîne des perfluorés ont également été analysés : c'était la personne la moins polluée de toutes, tout simplement parce que les salariés font attention et que la chaîne de production est parfaitement protégée. La personne la plus contaminée était une jeune fille de 17 ans dont le facteur d'exposition le plus évident était le maquillage bon marché importé de Chine qu'elle s'appliquait sur le visage. Il y en a donc partout et il est difficile d'être vigilant.

Vous l'avez bien dit, chaque fois que cela est possible, il faut substituer et réduire. Il existe des situations où la solution est évidente, comme le fart pour le ski. Si les autres compétiteurs n'ont pas non plus de PFAS dans leur fart, l'on est à égalité de concurrence.

Toutefois, je vois deux cas difficiles. Premièrement, les engrais agricoles. Je n'avais pas conscience que de très nombreux engrais contiennent des PFAS pour améliorer, par exemple, la stabilité dans les sols du pesticide que l'on souhaite administrer. Il me semble très compliqué d'imaginer une dépollution, alors même que l'on continuerait à administrer le polluant sur des sols déjà pollués, sachant que c'est là qu'il est le plus difficile à éliminer. Peut-on accepter de tels usages ? J'ai tendance à dire non.

Seconde difficulté : apparemment, il existe des PFAS dans les pneus et, à chaque freinage, une petite quantité est relarguée. Est-ce substituable ? Ceci fait partie des sujets dont je pense qu'ils diffèrent de celui du joint, indispensable au fonctionnement d'une usine. En effet, on parle là de millions de voitures avec quatre pneus et de millions de poids lourds avec bien plus de pneus encore. Est-ce que le PFAS est substituable ? Qui prend ce genre de décision ? Sachant, en outre, que nous importons des produits manufacturés chinois, par exemple, qui en comportent un grand nombre.

Vous évoquez le marquage. Or, s'il y a partout des PFAS, nous finirons par ne plus y faire attention. Par conséquent, un travail est-il mené au niveau européen pour déterminer ce qui est substituable ? Substituable au prix d'une moindre performance, cela se discute. Au prix de problèmes générés par ailleurs, cela se discute aussi. Où cette discussion a-t-elle lieu ?

M. Patrick Maestro. – Où cela se discute-t-il ? Avec vous tous et à l'échelon européen, car je pense qu'il faut avoir une vision européenne. Si nous sommes les meilleurs élèves, mais que les autres font différemment... L'enquête de l'Agence européenne des produits chimiques est très importante car elle va permettre à chacun de répondre. Nous pourrions le faire ensemble ou séparément, mais c'est en tout état de cause l'occasion de s'exprimer. Vous avez un rôle majeur, car vous écrivez les lois. Ces interdictions ou ces dérogations se décideront au niveau européen, puis au niveau des États.

Je n'ai pas connaissance de la présence de PFAS dans les pneus. Je connais un peu ce domaine, car Solvay vend des silices qui sont utilisées pour renforcer le caoutchouc et faire en sorte que les pneus durent maintenant 40 000 ou 50 000 kilomètres au lieu de 15 000 auparavant. Il faudrait demander à un fabricant de pneus – il y en a un très bon en France. Dans le caoutchouc de synthèse, le principal composant est le polystyrène butadiène et je ne vois ni l'intérêt ni la nécessité de la présence de PFAS. En revanche, les petites particules

relarguées au fil de l'usure du pneu dont madame Voynet a parlé sont des microparticules de caoutchouc qui contiennent de la silice et qui peuvent être ingérées par des animaux. Un pneu est constitué de caoutchouc, de polyamide et de fils de laiton pour le renforcer. Je ne vois pas la présence de PFAS, mais si vous avez un élément, je serais ravi de l'examiner.

Mme Dominique Voynet, députée. – La revue *Que Choisir* s'est penchée sur la question et a publié un dossier.

M. Patrick Maestro. – Je ne l'ai pas vu, bien que je consulte parfois cette revue. Je ne vois pas où il pourrait y avoir des PFAS dans les pneus, mais je ne prétends pas connaître toutes leurs utilisations.

L'exemple que vous avez donné sur le site Solvay de Tavaux est parfait. Sans passer sous silence les erreurs qui ont pu être commises il y a quarante ou cinquante ans et les pollutions avérées, vous avez montré que l'usine, aujourd'hui, fait ce qu'il faut pour protéger à la fois ses employés et l'environnement, puisque les rejets en sortie de site sont très contrôlés.

La plus grande toxicité était causée par un usage dont on peut largement se passer, à cause d'un produit qui contenait des tensioactifs fluorés. Il en va de même pour les engrais chimiques : on peut largement s'en passer. Si le PFAS concerné est un tensioactif fluoré – ce que je crois – ayant vocation à mieux stabiliser la molécule dans son application, on pourra utiliser un autre tensioactif. La formulation sera peut-être moins stable, un mois au lieu de six, mais il faudra que l'agriculteur travaille avec cela. Vous êtes donc exactement au cœur du sujet. Il faut – c'est facile à dire – très vite restreindre les applications et interdire celles qui ne sont pas essentielles. Dans ce cas, on peut perdre en performance, ce qui n'est pas très grave. J'espère avoir répondu à vos questions.

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office. – Cet échange illustre bien le rôle de l'Office, au carrefour de la science et de la politique. L'Académie des technologies fait de la technologie et rédige des rapports sur les technologies, et ne fait pas de politique. À l'Office, nous faisons un peu les deux : nous produisons des rapports et nous vous écoutons pour prendre connaissance des problématiques qui émergent comme conséquences de technologies nouvelles, afin de légiférer éventuellement. Les pistes que vous suggérez sont donc des pistes de réflexion pour le législateur.

S'agissant du lien entre substitution du produit et perte de performance, le questionnement porte toujours sur le bon levier à actionner et la massification de l'effet recherché. Faut-il regarder du côté des usages dans l'industrie plutôt que du côté des skis de compétition ? Dans la compétition de haut niveau, nous avons vu émerger des combinaisons qui aidaient les nageurs à faire tomber les records les uns après les autres à chaque compétition internationale. Du jour au lendemain, il a été décidé d'interdire ces combinaisons et d'annuler tous les records, non pour une question de pollution, mais de dénaturation de l'exercice. La décision a été soudaine.

À l'inverse, pour le sujet qui nous intéresse, les PFAS se sont progressivement immiscés, comme vous l'avez dit, dans presque tous les rouages de l'industrie. Aujourd'hui, il faut donc regarder au cas par cas comment l'on peut remplacer ces substances. C'est donc forcément un peu plus long qu'une décision unilatérale, mais je rejoins la fin de votre propos : c'est au politique de s'emparer de ces sujets.

M. Patrick Maestro. – Je ne veux pas défendre à tout prix les polymères fluorés. D'autres polymères, comme le PVC, posent beaucoup plus de problèmes de pollution. Nous verrons ce que cela donnera en fin de vie. Un jour ou l'autre, vous verrez sortir des sujets de ce type.

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office. – J'ai utilisé tout à l'heure le terme de « polluant éternel », que l'on emploie uniquement pour la catégorie des PFAS, mais il y en a probablement bien d'autres. Nous disposons de votre rapport intégral ; vous avez suscité notre curiosité et la semaine de suspension parlementaire qui s'ouvre nous permettra de nous adonner à cette saine lecture.

Monsieur Bonhomme, vous allez à présent nous exposer le rapport de l'Académie des technologies sur l'état de l'art de l'ordinateur quantique tolérant aux fautes, un sujet extrêmement pointu. Vous êtes un expert reconnu de l'industrie des télécommunications, vous avez notamment travaillé au sein du groupe Orange, où vous avez assumé différentes responsabilités, essentiellement en lien avec la R&D et le développement de solutions de télécommunication et informatiques.

Ce rapport de l'Académie des technologies est éminemment technique. L'Office avait adopté plusieurs notes scientifiques successives pour essayer de comprendre de quoi il s'agissait. Nous avons tous en tête les exposés brillants, mais un peu abscons, de notre ancien président Cédric Villani. Nous comptons donc sur vous pour mettre en lumière les avantages du calcul quantique et pour évaluer son impact. Vous nous expliquerez la terminologie de « calcul quantique tolérant aux fautes », qui est d'ailleurs un peu trompeuse, et exposerez ce qui pourrait avoir un impact pour certains usages et applications de cette technologie.

M. Thierry Bonhomme, membre de l'Académie des technologies. – Dès que nous parlons de quantique, la difficulté est que nous y adossons des notions, un vocabulaire et des résultats qui viennent du monde de la vie où règne le continu, pour les appliquer au monde de l'infiniment petit, qui relève plutôt du discontinu, du discret.

Vous avez sûrement entendu parler d'internet quantique, de mémoire quantique, de registre quantique, d'ordinateur quantique. Tout ceci ne veut rien dire. Toutes les idées que nous pouvons associer à ces mots – mémoire, internet, ordinateur – font référence à des fonctionnements et des modes d'interaction qui n'ont strictement rien à voir avec ce que nous fabriquons quand nous parlons de quantique.

Je vous demande d'oublier tout ce que vous savez pour plonger dans un monde quelque peu mystérieux. Étienne Klein est le physicien de référence qui pourra apporter de nombreux éclairages. Comprendre les technologies quantiques nécessite de mettre de côté un certain nombre d'éléments, puis de regarder ce que cela peut produire réellement. C'est ce qui a motivé, il y a trois ans, le lancement du rapport que je vais présenter : l'ordinateur quantique tolérant aux fautes.

Le premier physicien qui a évoqué le sujet dans les années 1980, Richard Feynman, disait que, plutôt que d'essayer de traiter avec des ordinateurs classiques des problèmes de chimie – les problèmes à N corps, les interactions possibles d'une molécule grâce à ses électrons pour fabriquer un objet aux propriétés bien spécifiées –, il fallait transférer ceux-ci dans le monde du quantique.

L'idée que certaines propriétés de la mécanique quantique – superposition et intrication, entre autres – permettraient d'aborder des problèmes inaccessibles aux ordinateurs classiques a donné lieu à une multitude de recherches. Celles-ci ont vraiment pris leur essor au niveau des gouvernements en 1995, quand Peter Shor a inventé un algorithme quantique proposant de factoriser assez rapidement des nombres entiers en nombres premiers et donc de casser le chiffrement RSA 2048, c'est-à-dire la clé de protection du monde bancaire, de l'internet, des échanges scientifiques ou militaires. C'est à ce moment que les États ont commencé à investir dans la recherche fondamentale et technologique visant à faire aboutir concrètement le concept d'ordinateur quantique.

S'est jointe au mouvement l'industrie informatique, qui voyait advenir la fin des lois de Moore – la multiplication par deux tous les dix-huit mois du nombre de transistors implantés sur un centimètre carré de silicium – et qui se demandait ce qu'elle pourrait trouver ensuite pour continuer d'effectuer des calculs de plus en plus compliqués.

Un des miracles de la mécanique quantique est que, sous certaines conditions, on peut avoir sur un registre de bits quantiques, ou qubits, une sorte de parallélisation du calcul – alors qu'un ordinateur classique travaille bit par bit – qui fait que celui-ci connaît une accélération exponentielle et que l'on peut traiter de façon simultanée des opérations qui dureraient des centaines de millions d'années avec le calcul classique. Cet effet d'accélération a motivé l'industrie et des investissements privés. Le tout, investissement de l'État, accélération du calcul et financement privé, a créé un contexte, ces dix dernières années, où des effets d'annonce auxquels on ne comprend rien s'empilent les uns sur les autres et empêchent toute lecture raisonnable de ce qui est réellement faisable, à quel prix et à quelle échéance. C'est dans ce contexte qu'est née l'idée de ce rapport, il y a trois ans environ. L'Académie a décidé de traiter ce sujet en même temps que le Secrétariat général pour l'investissement (SGPI) dans le cadre de France 2030, car Bruno Bonnel et l'expert quantique du SGPI, Neil Abroug, se posaient exactement les mêmes questions. À l'époque, le programme Proqima de la DGA n'était pas encore lancé. Il s'agissait d'y voir un peu plus clair dans cet univers de l'ordinateur quantique tolérant aux fautes et d'avoir un rapport objectif, un peu comme un phare, vers lequel les uns et les autres puissent revenir en permanence pour savoir où se situe la France. Nous avons donc choisi de ne pas traiter la modélisation quantique sur des ordinateurs classiques, ni ce que l'on appelle les ordinateurs quantiques analogiques. Il faut noter ce choix car c'est un sujet sur lequel des *start-up* du quantique qui travaillent sur l'ordinateur tolérant aux fautes commencent par fournir aujourd'hui des produits. C'est le cas de D-Wave aux États-Unis ou de Pasqal en France. Ces entreprises fournissent des objets qui sont plutôt des ordinateurs analogiques ou des ordinateurs NISQ (*noisy intermediate scale quantum*), autrement dit bruités. Leurs annonces mélangent plusieurs notions, d'où l'importance de bien segmenter ce dont on parle. Nous avons choisi de ne pas traiter des capteurs quantiques, qui sont essentiels à l'industrie militaire pour la navigation inertielle des sous-marins. La mesure du temps et la synchronisation des satellites sont des sujets essentiels, qui relèvent de l'industrie très mature des capteurs quantiques. Enfin, je ne traiterai ici ni de la cryptographie ni des communications quantiques.

L'expression « tolérant aux fautes » est associée à l'ordinateur à portes logiques. Par analogie avec le calcul classique et ses portes « et », « ou », « non », il existe des ordinateurs à portes pour le calcul quantique. On fait passer les qubits par ces portes et on modifie leur état, ce qui permet d'effectuer des calculs. Or utiliser un qubit pose deux difficultés majeures. D'une part, on aimerait interagir avec lui pour initialiser sa valeur, la stocker et la lire une fois les calculs effectués. D'autre part, le qubit est un objet éminemment sensible à son

environnement : la moindre vibration, un écart de température, une rencontre avec d'autres molécules, des particules cosmiques ou un peu de bruit magnétique lui font perdre la quasi-totalité de sa capacité quantique, que ce soit l'intrication ou la superposition, et le calcul s'effondre. Nous souhaitons donc une chose et son contraire : que ce qubit soit isolé, tout en pouvant interagir avec lui. Pourquoi est-ce si compliqué ?

Un qubit est un objet : soit un atome ou un ion dans un gaz, soit un système implanté sur de la matière – du silicium la plupart du temps – comme un qubit supraconducteur, soit un photon – une particule de lumière. Le bit en informatique classique est un 0 ou un 1 sur des transistors ; il est complètement standardisé et stable ; on le stocke dans des registres, on peut le calculer, puis le stocker à nouveau ailleurs.

Un qubit est un objet physique, contrairement à un bit. Les technologies pour en fabriquer sont très diverses : des électrons dans du silicium, des impuretés dans un cristal, *etc.* Pour faire fonctionner ces objets physiques et calculer, il faut passer par le truchement de divers objets mathématiques : des espaces vectoriels, des matrices, *etc.* C'est ce qui est compliqué : on peut parfaitement faire de la mécanique quantique sans rien comprendre à la physique sous-jacente, en ne faisant que des mathématiques, comme l'avait fait Werner Heisenberg.

Je reviens à la tolérance aux fautes. Les qubits sont des objets matériels. Pour les manipuler, on utilise des lasers, des guides d'ondes ou des champs magnétiques. On comprend bien pourquoi, en manipulant ces objets, en changeant une partie de leur phase ou de leur amplitude, on peut créer des erreurs. Avec l'ordinateur quantique à portes, il est donc nécessaire de concevoir des outils de correction d'erreur. Ce qui est miraculeux, ces dix dernières années, c'est que les chercheurs ont trouvé des mécanismes théoriques – qui restent à mettre en œuvre – permettant de corriger ces erreurs. C'est la condition à laquelle on peut livrer un ordinateur quantique utile. Qu'est-ce qu'un ordinateur « utile » ? Pour effectuer des calculs comme l'algorithme de Shor – casser les clés RSA et factoriser des nombres –, pour des calculs de chimie à N-corps, pour l'optimisation combinatoire ou la recherche d'objets dans des dossiers non structurés, il faut un certain nombre de portes de calcul, de l'ordre de 10^{12} à 10^{15} , ce qui est considérable. À titre de comparaison, l'ordinateur classique le plus puissant au monde aujourd'hui, l'américain Frontier, effectue 10^{18} opérations par seconde.

Le meilleur qubit physique que l'on sait fabriquer aujourd'hui présente un taux d'erreur de l'ordre de 10^{-3} ou 10^{-4} . Or, s'il y a une chance sur mille qu'une erreur se produise à chaque passage de porte, au bout de 10^{12} portes, le calcul est quasi certainement faux. C'est là que réside l'importance de la tolérance aux fautes : il faut absolument pouvoir fabriquer un objet dont le taux d'erreur à chaque passage de porte est inférieur au nombre de portes à franchir.

Pour rédiger ce rapport, il nous a fallu deux ou trois ans. Toute l'industrie française a pu apporter son concours et, comme le groupe de travail de l'Académie des technologies ne disposait pas de toutes les compétences requises, nous sommes allés chercher des personnes comme Jean-Philippe Nominé, Frédéric Magniez ou Philippe Grangier, qui sont des sommités dans diverses spécialités de la mécanique quantique, reconnues tant en France qu'à l'étranger.

Le plan du rapport reflète les questions fondamentales. Au-delà des promesses faites par tous ceux qui ont intérêt à communiquer positivement sur le sujet, que sait-on réellement faire et quelle est la réalité de ce qu'on appelle l'avantage quantique ? Comment concevoir et implanter les codes correcteurs d'erreur ? Peut-on aujourd'hui choisir une technologie de

qubits parmi toutes celles existantes ? Ensuite, comment passer à l'échelle ? Cette dernière question pose un problème d'architecture similaire à celui des ordinateurs classiques. Il faut utiliser des processeurs, car on ne sait pas fabriquer des puces de silicium de plusieurs mètres carrés. Comment, alors, interconnecter des processeurs quantiques tout en préservant leurs propriétés quantiques, c'est-à-dire la superposition et l'intrication ?

Nous avons également abordé des questions complémentaires complexes : le coût, les technologies concurrentes comme l'intelligence artificielle et les réseaux de tenseurs, le calcul haute performance (HPC), etc. Ce dernier est-il vraiment limité par la loi de Moore ? N'existe-t-il pas d'autres technologies, comme les technologies 3D, qui permettraient d'augmenter la puissance des ordinateurs actuels ? Voilà, en substance, la trame que nous avons suivie.

Venons-en à la réalité de l'avantage quantique. Certaines propriétés de la mécanique quantique autorisent du calcul en parallèle sur un registre de qubits et offrent la possibilité d'accélérer de façon exponentielle les algorithmes. Le problème est que très peu d'algorithmes sont susceptibles de bénéficier d'une telle accélération exponentielle s'ils étaient exécutés sur un ordinateur quantique tolérant aux fautes – si celui-ci existait : on connaît l'algorithme de Shor et quelques algorithmes en chimie pour les problèmes dits NP, mais c'est tout. La plupart des algorithmes dont nous disposons pour l'analyse combinatoire – ce qui est très important pour l'industrie, par exemple pour le problème d'optimisation du voyageur de commerce ou les problèmes de réseaux de télécommunication –, les algorithmes dont nous disposons pour la recherche dans de grandes bases de données, qui pourraient être très utiles pour l'intelligence artificielle ainsi que dans tous les processus industriels, offrent une accélération dite polynomiale, ce qui signifie que le temps de calcul est de l'ordre de n^2 plus petit que sur un ordinateur classique. Il faut toutefois qualifier les problèmes, car si ceux-ci ne sont pas extraordinairement complexes, un ordinateur classique fait tout aussi bien le travail sans qu'il soit besoin d'investir dans un ordinateur quantique. Le rapport de l'Académie s'efforce donc de recadrer ce que l'on entend par « avantage quantique », expression souvent utilisée dans les publications, en listant les problèmes que l'on veut traiter et les usages que l'on veut satisfaire : la recherche dans de grandes bases de données, l'optimisation combinatoire, l'algorithme de Shor, les problèmes NP ou encore les problèmes à N corps de la chimie. Le rapport tente de préciser les ressources nécessaires pour traiter ces problèmes et ce que pourrait faire un ordinateur quantique tolérant aux fautes s'il existait. Le fait qu'il n'existe pas encore est lié à la gestion des erreurs des qubits. Il faut avoir ce problème en tête, car on entend aujourd'hui des annonces de *start-up* ou de grands industriels américains qui disent être capables de réunir des centaines de milliers de qubits sur un seul support, mais ils n'évoquent absolument pas la mise en œuvre de codes correcteurs d'erreur sur ces qubits, ni la disponibilité des algorithmes que l'on peut faire tourner dessus. C'est l'un des biais de la communication des *start-up* qui est ainsi mis en évidence.

Comment fonctionne la correction d'erreur ? Le principe consiste à disperser l'information portée par un qubit physique sur plusieurs qubits physiques. La diapositive projetée montre par exemple un qubit encodé sur 25 qubits physiques.

Les qubits d'encodage de l'information sont assistés par des qubits dits « ancillas » – la schématisation de cet ensemble s'appelle « code de surface » –, qui aident à réaliser des mesures de parité permettant de détecter quel qubit est en faute et si l'erreur porte sur l'amplitude ou sur la phase. Toute erreur sur un qubit peut en effet être réduite à l'une ou l'autre. Des théorèmes démontrent que si le taux d'erreur d'un qubit physique unitaire est

inférieur à un seuil de l'ordre de 10^{-3} , plus on en ajoute dans le code de surface, plus le taux d'erreur de l'objet complet, que l'on appelle un qubit logique, diminue. Le qubit logique est donc un assemblage de qubits physiques dotés d'outils de contrôle – les ancillas –, qui sont des qubits spécialement utilisés pour contrôler et corriger l'état du qubit logique chaque fois qu'une erreur est détectée. Ce dispositif est par conséquent extrêmement consommateur de qubits. Pour obtenir un qubit logique avec un taux d'erreur de 10^{-12} , en partant d'un qubit physique à 10^{-3} , il faudrait un code de surface contenant plusieurs milliers, voire plusieurs centaines de milliers de qubits physiques. La question est donc de savoir comment assembler plusieurs milliers d'objets physiques – supraconducteurs, atomes, ions, photons – sur un seul support.

Mme Dominique Voynet, députée. – Ne peut-on pas combiner plusieurs technologies pour faciliter cela ?

M. Thierry Bonhomme. – Tout à fait, c'est même la voie dans laquelle quasiment toutes les technologies se sont engagées aujourd'hui.

Toutes les grandes technologies – l'ion, l'atome neutre, le supraconducteur, le spin dans le silicium, l'impureté dans le diamant et le photon – sont parties sur des bases monolithiques, chacune avec des qualités de qubit, des problèmes et des mécanismes de correction d'erreur spécifiques. Désormais, elles imaginent toutes une forme d'hybridation. Par exemple, un qubit supraconducteur est une sorte d'horloge dont les régimes de fréquence encodent l'information. Si l'on ajoute un électron dans le même substrat de silicium, on peut utiliser le spin de cet électron, qui possède d'autres propriétés de stabilité. En combinant les deux, on peut concevoir des portes et des corrections d'erreur qui bénéficient des particularités de chaque technologie. Cette hybridation est un thème extrêmement important qui pourrait ouvrir la voie à des consolidations dans l'industrie.

La correction d'erreur est essentielle et consubstantielle à l'ordinateur quantique pour traiter les problèmes utiles, que ce soit avec des accélérations exponentielles ou polynomiales. Elle est très difficile à mettre en œuvre, même si la recherche progresse sur les codes correcteurs d'erreur pour consommer moins d'ancillas. C'est le principe des codes LDPC : on utilise moins de qubits physiques pour contrôler et corriger les erreurs. L'autre technique est celle développée par la *start-up* française Alice & Bob, qui encode l'information non pas sur deux dimensions d'un système quantique, en l'occurrence deux niveaux d'énergie, mais sur un seul niveau en utilisant des codes bosoniques. C'est une technologie particulière mais très prometteuse, qui permet une correction automatique des erreurs sur l'amplitude – il reste à corriger la phase. Ce système est beaucoup moins consommateur de ressources.

Au-delà de la stabilité du qubit physique, la bonne intégration des codes correcteurs d'erreur est un enjeu fondamental pour la réalisation de l'ordinateur quantique. Une publication portant sur le nombre de qubits que l'on a pu mettre sur un support donné n'a aucun intérêt si elle n'indique pas le code correcteur d'erreur associé et son coût, ce que l'on appelle les *overheads*.

Je le redis, car il est extrêmement important de l'avoir bien en tête : le qubit est un objet, matériel ou non : un photon – on parle de qubit photonique –, un gaz, sous forme d'atome ou d'ion, ou encore un support cristallin, supraconducteur ou silicium. On voit tout de suite les facteurs d'intégration ou d'intérêt des différentes industries. La bonne nouvelle est que la France compte cinq industriels très bien positionnés : Pasqal sur les atomes neutres et froids ; Alice & Bob sur le qubit supraconducteur ; Quobly et C12 sur les qubits dans le

silicium. Quobly, à Grenoble, travaille vraiment sur le qubit silicium. C12 est original, car ils mettent des électrons dans des nanotubes de carbone. Nous avons bien sûr Quandela sur les qubits photoniques avec Pascale Senellart. Alain Aspect travaille avec Pasqal, et Michel Devoret travaille sur les qubits supraconducteurs. Deux prix Nobel impliqués, c'est une excellente performance.

On note qu'il n'y a pas de grand industriel européen en soutien des *start-up* françaises, ce qui est le problème. Ce n'est pas le cas aux États-Unis. La valorisation d'Alice & Bob doit se situer entre 100 et 200 millions d'euros. Ils ont effectué une levée de fonds de 100 millions et en préparent une nouvelle – c'est ce qui se dit dans la presse – de 500 millions d'euros. Quandela doit valoir entre 50 et 100 millions. Le concurrent IonQ aux États-Unis, une entreprise cotée en bourse, est valorisé entre 15 et 20 milliards d'euros. Les ordres de grandeur sont donc sans commune mesure, ce qui rejaillit sur les capacités, en particulier pour les acquisitions ou les pivots, car dans ce secteur tout est en devenir. IonQ s'est aperçue que sa technologie d'ions piégés était moins performante que celle d'Oxford Ionics et l'a donc achetée.

Le soutien des *start-up* par des acteurs beaucoup plus gros ou des fonds, étatiques ou privés, est donc un sujet fondamental. L'Europe commence aujourd'hui à s'y atteler avec le *Quantum Act*, mais cela pose des problèmes, car chaque pays européen a son champion. De plus, les huit grandes catégories de technologies – les colonnes de la diapositive dans lesquelles j'ai rangé les industriels – recouvrent en fait des technologies différentes. Par exemple, les solutions de Pasqal et de l'Institut Max Planck à Munich relèvent toutes deux des « atomes froids », mais ce sont deux technologies qui n'ont strictement rien à voir entre elles. Si l'on voulait marier ces deux *start-up*, ce serait extrêmement compliqué. L'une travaille sur du rubidium, l'autre sur du strontium ; l'une utilise des pinces laser pour manipuler des atomes un par un, l'autre une matrice d'interaction laser pour créer des puits de potentiel au fond desquels ses qubits sont calés.

Le problème de l'Europe sera de trouver le moyen de combiner les différentes *start-up* en concurrence pour ne retenir finalement que deux technologies, car il sera compliqué à l'échelle européenne d'en soutenir davantage. C'est d'ailleurs ce que prévoit Proqima, le programme lancé par la direction générale de l'armement, doté de 500 millions d'euros. Il prévoit des étapes à passer pour les cinq compétiteurs que j'ai mentionnés – C12, Alice & Bob, Quobly, Quandela et Pasqal – d'ici 2032, avec l'objectif d'avoir un ordinateur tolérant aux fautes de l'ordre de 100 qubits logiques en 2032.

Pourquoi ne peut-on pas décider tout de suite quelle technologie de qubit retenir ? Parce que nous ne savons pas dire laquelle a de l'avenir et laquelle sera une impasse.

La diapositive projetée maintenant est tirée des travaux d'Olivier Ezratty, consultant et auteur spécialisé dans les technologies quantiques depuis des années, qui a été un contributeur important du groupe de travail. Il n'y a pas une technologie dont toutes les caractéristiques seraient optimales, ni une technologie que l'on pourrait exclure. Le problème est que, lorsque cinq ou six technologies sont en concurrence, on divise par six la capacité de soutien à chacune. Il faut trouver, avec ces objets physiques, une variable quantique à deux niveaux, qui permettent de coder les deux états « 0 » et « 1 ». C'est ainsi que l'on fabrique le qubit.

Sur les sujets de l’algorithmique, il faut qualifier les usages. Le problème vient du fait que les industriels en Europe, et particulièrement en France – nous avons interrogé beaucoup d’industriels du CAC 40 –, ont beaucoup travaillé sur la simulation quantique, donc sur les ordinateurs quantiques analogiques, et sur les ordinateurs NISQ. Un ordinateur NISQ, comme ceux que Quandela et Pasqal ont vendus au CEA, est un ordinateur « bruité » : il n’y a pas de correction d’erreur. Chaque fois que les qubits physiques passent une porte, sans correction d’erreur, il se produit statistiquement un millième ou un dix-millième d’erreur. Or les qubits peuvent être amenés à passer 1 000 ou 3 000 portes, ou plus ; au bout de 3 000 portes, le calcul est faux, il ne veut plus rien dire. C’est cela, un ordinateur bruité, et il est limité en nombre de portes. Pour avoir les ordres de grandeur en tête, un algorithme utile, c’est au moins 10^{12} portes.

Le groupe de travail a fourni cet imposant rapport, disponible sur le site internet de l’Académie. Nous avons décidé de prolonger le travail, avec le soutien du SGPI. La question de Mme Voynet illustre très bien l’opportunité d’un tel prolongement : on en vient maintenant à des technologies hybrides alors que ce n’était pas le cas lorsque le travail sur le rapport a commencé, même si l’idée était très certainement présente dans les recherches des *start-up*.

J’ai indiqué précédemment que l’interconnexion des *Quantum Processing Units* (QPU) – l’analogue des *Central Processing Units* (CPU) – doit se faire en préservant les attributs de la mécanique quantique. Il ne s’agit pas simplement de mettre une fibre optique ou un guide d’onde entre deux processeurs ; il faut que la fibre ou le guide préserve la superposition et l’intrication, sans que le signal soit bruité. Ce sont des technologies en cours de développement et qu’il faut continuer d’étudier.

Un deuxième sujet est l’algorithmie quantique, dont il faut accompagner le développement. Je souligne l’importance de ce message dans cette enceinte d’élus. Nous n’avons pas de centre de compétences suffisamment développé dans ce domaine. Le pire serait de fabriquer un ordinateur quantique sans avoir aucun algorithme utile à faire tourner dessus. On parle de « quantum gap » dans la littérature anglaise. Par ailleurs, pour faire tourner un algorithme sur un ordinateur, il faut des compilateurs pour passer de l’algorithme écrit dans un langage structuré à l’information utile pour les CPU ou les QPU. Aujourd’hui, les compilateurs dont nous disposons sont très spécifiques, associés à chacune des technologies. Y aura-t-il un jour un compilateur universel ? C’est un sujet compliqué.

Troisièmement, le passage à l’échelle, qui consiste à passer d’une puce de laboratoire de 100 qubits logiques à un ordinateur comportant 10^{12} à 10^{20} portes, implique d’aligner plusieurs QPU. Tous ces dispositifs ont besoin de conditions extrêmes, comme le froid ou le vide, ce qui en fait des objets technologiques extrêmement complexes. De plus, pour la correction d’erreur, il faut savoir que le passage de porte s’effectue en nanosecondes ou en microsecondes. Chaque fois qu’une erreur se produit, il faut donc un objet de calcul qui permette de la corriger à cette échelle de temps. Il y a donc un mariage à faire entre l’ordinateur quantique et un calculateur de haute performance. Faut-il le faire avec des puces reprogrammables, les FPGA, ou avec des ASIC, c’est-à-dire un circuit intégré spécifique à une application ? En tout état de cause, c’est un peu comme pour les chercheurs d’or : ceux qui fabriquent les pelles et les pioches pourraient bien prendre le pouvoir dans cette dynamique. Les technologies habilitantes sont un thème fondamental. Il existe en France un programme, Q-Loop, un programme et équipement prioritaires de recherche (PEPR) mis en place en soutien de l’industrie des technologies habilitantes. Cependant, sur ce sujet, ce sont

plutôt la société Zurich Instruments et des acteurs israéliens qui sont les mieux positionnés aujourd'hui.

Quatrième sujet : les compétences. La France est très chanceuse, car elle dispose d'une capacité de recherche très importante – avec des instituts comme l'Inria, le CEA, le CNRS et les universités ou les écoles d'ingénieur –, comme l'illustre le nombre de prix Nobel qui ont récompensé des chercheurs français ces dernières années autour du quantique. Comment préserver cet atout et l'étendre à des domaines qui sortent de la mécanique quantique proprement dite pour aborder la compilation, l'algorithmique ou les technologies habilitantes, qui relèvent tous d'une ingénierie de très haut niveau ? Comme pour l'intelligence artificielle, ceci suppose que les métiers soient connus, quelles que soient les technologies sous-jacentes aux qubits.

Cinquième thème : la consolidation industrielle européenne. Si nous voulons faire face aux Chinois qui ont créé une « ville du quantique », comme ils l'ont fait à Shenzhen pour l'industrie des télécoms, et si nous voulons fédérer les pays européens qui ont tous des capacités et des champions, un énorme effort est à fournir. Il faudra probablement procéder par mise en concurrence, comme la France le fait avec Proqima, pour identifier puis marier les industriels les uns avec les autres, et définir une industrie de technologies habilitantes en soutien.

Ceci devra être réalisé en gardant à l'esprit le fait que, du point de vue économique, les autres technologies n'ont pas jeté l'éponge. Premièrement, on fait du silicium 3D pour le calcul haute performance, en empilant des couches de circuits logiques. Évidemment, peut-être ne fera-t-on pas ainsi 10^{30} portes, car la consommation d'énergie et les interactions sont extrêmement fortes et complexes. Deuxièmement, il existe d'autres méthodes mathématiques, comme les réseaux de tenseurs, pour traiter des problèmes complexes susceptibles d'être traités par un ordinateur quantique. Nous avons interrogé Xavier Waintal à Grenoble, l'un des spécialistes de ces calculs qui tournent sur HPC et permettent d'approcher les problèmes du type « à N corps », à condition qu'ils ne soient pas trop complexes, c'est-à-dire que la profondeur à traiter ne soit pas trop importante. Troisièmement, l'intelligence artificielle progresse énormément, notamment lorsqu'elle est mariée à d'autres disciplines, comme l'a montré le prix Nobel de chimie attribué il y a deux ans à l'un des fondateurs de l'IA. Enfin, la science étant ce qu'elle est, tant qu'un théorème n'affirme pas que c'est impossible – comme le dit Alain Aspect –, d'autres choses arriveront peut-être. Nous voyons donc notre sujet entrer dans une sorte de confrontation à la réalité : l'ordinateur quantique tolérant aux fautes, à quel coût et pour quel usage ? Il faudra garder ce questionnement à l'esprit. C'est ce que l'Académie des technologies voudrait continuer à étudier.

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office. – Merci beaucoup. Nous avons raison de dire que l'on ne comprend pas grand-chose à ce sujet éminemment complexe, qui ne peut se résumer en quelques phrases. La vulgarisation faite aujourd'hui autour d'objets comme l'ordinateur quantique montre bien qu'il faut être un expert pour démêler tout cela et comprendre la multiplicité des technologies. Il n'y a pas une technologie qui prenne le dessus aujourd'hui. S'il pouvait de nouveau y avoir un élan européen sur ce sujet, nous serions sans doute un peu plus performants pour faire face aux géants américains qui, eux, ont bien compris qu'il s'agissait d'un marché d'avenir.

Mme Dominique Voynet, députée. – Le ministère de la défense est évidemment très impliqué sur un sujet de ce genre. Des crédits spécifiques s'ajoutent-ils à ceux que vous avez cités ?

M. Thierry Bonhomme. – Le programme Proqima résulte d'un accord entre le SGPI, la direction générale des entreprises (DGE) et la délégation générale pour l'armement (DGA) – ce qui me paraît très bien – pour qu'une seule entité porte le programme de soutien à l'industrie quantique en France, en particulier sur l'ordinateur tolérant aux fautes.

Il a procédé par mise en concurrence et a sélectionné cinq participants parmi tous les candidats potentiels – car des *start-up* françaises comme Columbus ou WeLink n'étaient pas assez mûres pour y entrer. Des critères ont été mis en place pour affiner la sélection au fil du temps, ainsi qu'une dotation de 500 millions d'euros sur huit ans, qui, à ma connaissance, n'a pas été remise en cause. C'est un très bon signe, car un tel soutien ne peut bien fonctionner que dans la durée. La cible à atteindre a été fixée : deux technologies à horizon 2032, et une puissance de 100 qubits logiques.

Ce schéma sera probablement repris dans le plan de la Commission pour soutenir l'industrie européenne.

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office. – Nous allons maintenant redescendre un peu sur Terre. La dernière présentation de cette matinée portera sur la biomasse dans la transition énergétique. Dominique Vignon, coordinateur du rapport, va nous en faire la synthèse. Monsieur Vignon, vous êtes spécialiste des questions énergétiques et vous avez notamment dirigé une belle entreprise, que je connais un peu dans mon territoire, qui s'appelle Framatome. Vous continuez à vous intéresser à un grand nombre de sujets et de filières dans le secteur de l'énergie.

Le rapport que vous allez nous présenter traite de l'utilisation de la biomasse dans notre pays, de sa disponibilité – souvent pointée pour atteindre les objectifs de baisse de nos émissions de CO₂ – et des moyens d'optimiser son usage en lien avec ces mêmes objectifs.

Les attentes exprimées il y a quelques années ne semblent pas tout à fait au rendez-vous. Vous allez donc nous expliquer les raisons de cet écart, puis les projections sur l'avenir.

M. Dominique Vignon, membre de l'Académie des technologies. – Le thème de ma présentation est le suivant : « *Réservez votre biomasse, il n'y en aura pas pour tout le monde.* » La biomasse est un produit extrêmement pertinent et intéressant, mais disponible en quantité limitée, car c'est dame Nature qui nous la donne et l'on n'appuie pas sur un bouton pour accélérer sa production.

La biomasse est partout. En entrant dans cette salle, j'ai été frappé par cette très belle photo accrochée au mur : on croit y voir un champ d'éoliennes, mais il s'agit d'une série de champs de colza, et il y a sans doute plus d'énergie dans ces champs que dans les éoliennes. La biomasse est extrêmement intéressante, car elle résulte de la capture du carbone dans l'atmosphère par la photosynthèse naturelle. Le CO₂ ainsi capté peut être stocké durablement dans des matériaux de construction ou d'autres produits, ou être utilisé sous forme énergétique. Dans ce dernier cas, le carbone est relâché dans l'atmosphère, mais il s'agit d'un carbone préalablement capté. La doctrine de l'Union européenne – qui peut être discutée – est

que cette biomasse, même brûlée, est neutre en carbone. C'est donc un produit assez versatile, aux utilisations multiples, dont les usages énergétiques sont, entre guillemets, vertueux.

Conséquence de ces vertus, tout le monde en veut. La diapositive actuellement projetée montre comment la biomasse est prise en compte dans les études de prospective énergétique. Ce graphique de référence montre, de 1960 à 2050, l'évolution des consommations énergétiques françaises. La partie grisée, qui contient plusieurs nuances, représente les combustibles fossiles. L'enjeu est, après qu'elle est passée par un plafond au début des années 2000, de faire décroître, et si possible disparaître, la consommation des combustibles fossiles. Pour y parvenir, il existe deux leviers : l'électrification et la production de chaleur. La chaleur se divise elle-même en deux parties : la chaleur non-biomasse, essentiellement la géothermie ou la récupération de chaleur, disponible en quantité limitée, tout comme l'électricité – pour de nombreuses raisons que je n'expliciterais pas ici. Le résidu est donc la biomasse. Les planifications énergétiques et climatiques françaises, comme la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC 2 et SNBC 3), ont utilisé la biomasse comme terme de bouclage. Le raisonnement est le suivant : *« J'arriverai à produire telle quantité d'électricité, à récupérer telle quantité d'énergie du sol, et le solde, la biomasse le fournira. »*

Une multitude d'études ont été réalisées entre 2021 et 2025 par différents organismes pour apprécier la quantité de biomasse qui serait disponible à l'horizon 2050, date de l'objectif de neutralité carbone. Ces évaluations sont extrêmement différentes. Certaines études concluent que 430 TWh de biomasse seront disponibles, d'autres 245 TWh. L'écart va presque du simple au double ; il est considérable. Dans le rapport que je présente, réalisé conjointement avec l'Académie d'agriculture de France, plus familière de ce sujet que l'Académie des technologies, nous avons souhaité comparer ces chiffres et comprendre pourquoi il y avait de telles différences. À titre d'exemple, dans la SNBC 2, la demande de biomasse en 2050 est de 460 TWh. De nombreuses critiques se sont élevées, France Stratégie a notamment publié un rapport vers 2023-2024, indiquant que cela n'était pas crédible, ce qui a suscité certaines des études que je viens d'évoquer. RTE, l'opérateur du réseau de transport d'électricité, a estimé ce potentiel à 300 TWh dans son étude « Futurs énergétiques » de 2022. Une révision est en cours et la proposition actuelle aboutit à 280 TWh, ce qui représente une forte réduction. Un document de référence, issu d'un travail conjoint du Conseil général de l'économie (CGE), du Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (CGAAER) et de l'Inspection générale de l'environnement et du développement durable (IGEDD), aboutit à une estimation de 170 à 250 TWh de biomasse en 2050. Jusqu'à récemment, des études prospectives publiques se fondaient pourtant sur 460 TWh, et les estimations de RTE sont encore sensiblement supérieures à cette valeur.

Pourquoi de telles différences ? Parce qu'au nombre des critères d'utilisation de la biomasse, il y a les objectifs de développement durable (ODD) de l'ONU, qui donnent notamment la priorité à l'alimentation par rapport à la production d'énergie et promeuvent la durabilité, c'est-à-dire le fait de ne pas utiliser plus de biomasse que ce que la nature produit – c'est particulièrement important pour les forêts. Pour ces raisons, la biomasse n'est pas profondément extensible. Ces raisons sont d'ailleurs quelque peu contournées, puisque l'on utilise de la biomasse pour produire du carburant automobile, à hauteur d'environ 30 TWh par an. Mais cet usage est discutable et plafonné par la réglementation européenne. Ainsi, lorsque nous avons superposé les multiples études et le respect des critères du développement durable, nous avons constaté – « nous » n'est pas un pluriel de majesté, il s'agit de notre académie et de l'Académie d'agriculture – qu'une seule étude respectait ces critères : celle des conseils généraux et de l'inspection générale.

La première conclusion est donc qu'il y a un déficit de biomasse, car les perspectives d'utilisation et les quantités prises en compte sont manifestement supérieures à ce qui est réaliste et raisonnable. Le secrétariat général à la planification écologique (SGPE) a d'ailleurs publié, fin 2025, une étude de synthèse sur la décarbonation de la France à l'horizon 2050. Un graphique de ce rapport montre qu'il y a un déficit de biomasse par rapport aux besoins français pour la décarbonation dès 2030. Ce déficit, représenté par les rectangles rouges sur le graphique projeté à l'écran, existe tant pour la biomasse liquide que pour les biomasses solide et gazeuse. Je voudrais apporter d'autres éléments pour étayer mes affirmations. Pour les différents types de biomasse – solides, liquides, gaz –, je dirai brièvement pourquoi chacune de ces formes connaît des limites.

Un premier graphique, issu de l'étude des conseils généraux, montre comment la biomasse évoluerait jusqu'en 2050. Il indique que la biomasse liquide peut augmenter, et même presque doubler par rapport aux quelque 30 TWh que j'ai mentionnés, pour atteindre une soixantaine de térawattheures, mais pas plus, car les ressources ne le permettent pas. Actuellement, les ressources en France sont essentiellement la betterave et le colza, et un peu le maïs. Comme je l'ai dit précédemment, la fabrication de biomasse liquide à partir de ces trois cultures est, à certains égards, critiquable et certainement limitée. Ces ressources sont actuellement utilisées dans des procédés de première génération. La biomasse liquide peut cependant bénéficier d'autres ressources. Une plus grande exploitation forestière, par exemple, associée à la transformation de biomasse solide en biomasse liquide par des procédés de deuxième génération. Il y a aussi les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) : entre deux cultures principales, on sème pour quelques mois une culture de couvert qui a en plus l'intérêt d'être assez florifère et de générer de bonnes quantités de biomasse. Les cultures intermédiaires ont cependant des limites. Pour obtenir beaucoup de biomasse, il faut des engrais et de l'arrosage, notamment pour les CIVE d'été, sans certitude qu'elles germent. Il n'est donc pas certain que l'on puisse produire à tout va de la ressource de biomasse liquide, d'où la limitation que j'ai mentionnée.

Le deuxième vecteur de biomasse sur lequel on compte beaucoup aujourd'hui est le biométhane, issu de la méthanisation. On voit des méthaniseurs pousser comme des champignons dans les campagnes, ce qui constitue indéniablement une ressource annexe pour les agriculteurs et une diversification de leur activité. Cette évolution a aussi des limites, notamment en raison de possibles concurrences d'usage de la biomasse. La première est l'accès aux intrants. Que va-t-on méthaniser ? Le supplément d'intrants par rapport à la situation actuelle pourrait venir des CIVE ou des résidus de culture, mais cela n'est pas infini.

Une deuxième limite résulte du fait que ce qui retournait au sol, par exemple au titre de cultures de couverture comme les légumineuses entre les cultures principales, ne lui sera plus restitué si on le méthanise. C'est autant de matière organique que les sols n'auront pas et qui devra être compensée, ce qui pose une problématique d'engrais. Il y a donc des limites physiques.

De surcroît, il y a des limites économiques, puisque le biométhane est environ trois fois plus cher que le méthane. Quelqu'un doit payer, et aujourd'hui, ce sont les contribuables *via* le soutien de l'État. Le soutien au biogaz sera transféré vers le système des certificats d'économie d'énergie à partir de l'année prochaine. Ce ne sera plus le budget de l'État qui le portera, mais les obligations faites aux vendeurs de gaz d'incorporer un minimum de biogaz. Pour cela, ils devront acheter ce biogaz et pourront imputer les crédits d'économie d'énergie

acquis. Ils paieront donc le surcoût, et *in fine*, le consommateur le paiera, car c'est ainsi que le système fonctionne. Le potentiel d'expansion du biogaz est donc limité.

Venons-en à la biomasse forestière. Dans les prévisions, elle est à peu près stable, car la forêt française n'est pas si mal exploitée, à vrai dire, et parce qu'il y a des limites. Un problème est le respect du critère d'utilisation en cascade de la biomasse, particulièrement pertinent depuis le protocole de Rio pour la biomasse forestière. Le principe est d'abord d'utiliser celle-ci pour des usages qui l'immobilisent et ne relâchent pas le CO₂, comme le fait la combustion. Or, en France, nous ne le faisons pas, du moins pour les chênes et les hêtres ; nous le faisons davantage pour les pins et les sapins. Pourquoi ? Parce que la situation de l'industrie française du bois est très mauvaise. Ses capacités à transformer le bois en produits de construction ou d'ameublement sont assez faibles, et la France est globalement importatrice sur ces segments. Par conséquent, quand on coupe des arbres, soit quand ils sont en fin de vie, soit pour des coupes d'éclaircie, puisqu'il n'existe pas les capacités industrielles pour les transformer en bois de construction ou en bois meuble, on les transforme en bois de chauffage, soit directement, soit en granulés pour les chaufferies ou les particuliers. La photographie projetée à l'écran montre un parc de bois d'une usine de production de granulés située dans le centre de la France. On y voit de gros arbres. Ceux-ci pourraient être traités comme bois d'œuvre, mais ils ne le sont pas, car il n'y a pas l'industrie pour le faire. Ils sont donc destinés à l'énergie-chauffage. C'est une situation de fait à laquelle on ne peut sans doute pas grand-chose, car on ne crée pas un système industriel d'un coup de baguette magique.

On pourrait néanmoins se dire que l'on a besoin de plus de bois comme source d'énergie, donc que l'on va exploiter davantage la forêt, mais nous nous heurtons à un autre problème, la chute du puits de carbone. Ce puits de carbone a permis de capter jusqu'à 50 millions de tonnes de CO₂ par an par les forêts françaises, mais il a vu sa capacité diminuer très fortement pour diverses raisons : maladies, insectes et dépérissement consécutif aux aléas de température. Alors que la capacité du puits de carbone devrait évoluer selon la courbe rouge pour tenir les objectifs de décarbonation, elle est, au mieux, constante. Si l'on exploitait plus la forêt, le puits de carbone naturel diminuerait.

Je passe sur les problématiques de particules fines, associées au chauffage, notamment individuel ; il crée des problèmes d'émission sur lesquels je ne m'étends pas.

J'en arrive à la fin de ma première partie, en espérant vous avoir convaincus que la quantité de biomasse est insuffisante. Dès lors, la question devient : que faire ? Même en faisant tout ce qui est possible pour accroître les quantités produites, on ne pourra pas disposer de davantage de biomasse, il faut donc prioriser les usages.

Où faut-il orienter la biomasse ? Pour traiter le sujet correctement, il faudrait faire une simulation du système énergétique dans sa totalité et modéliser les coûts de différentes stratégies d'utilisation de la biomasse, puis mettre en regard les économies de CO₂. Ces modèles seraient extrêmement compliqués, car les acteurs et les usages de la biomasse sont innombrables. Le problème peut être considérablement simplifié en considérant que l'on dispose d'une certaine quantité de biomasse, par exemple 50 TWh de biométhane. Quel est le meilleur usage possible ? Le raisonnement retenu est le suivant : le meilleur usage est celui qui conduit à un coût de décarbonation minimal pour la collectivité. Le but est de décarboner et la quantité de biomasse disponible peut être affectée à l'usage A ou à l'usage B. Le logigramme projeté à l'écran montre les options ouvertes, et s'il n'y a pas de solution

alternative pour décarboner A ou si une telle solution n'est possible qu'à un coût plus élevé, il vaut mieux investir sur A que sur B. Le rapport se réfère au coût d'abattement, au coût de la tonne de carbone évitée établi par France Stratégie, qui est de l'ordre de 500 euros en 2035. Il compare les coûts d'abattement des usages alternatifs de la biomasse et détermine lesquels permettent de décarboner au moindre prix.

J'en viens à quelques exemples d'application de cette méthode, tout d'abord à la biomasse solide à cycle long – c'est-à-dire aux forêts. Cette biomasse émet instantanément du CO₂ si on la brûle ; elle ne sera reconstituée qu'après 2050 ; elle est considérée comme durable par la directive RED III, même si ce caractère durable est discuté et discutable. J'ai évoqué la nécessité de donner la priorité à la reconstitution d'une industrie forestière. Il est regrettable d'avoir la plus grande surface forestière d'Europe sans l'industrie qui va avec. Dans l'attente, il faut brûler le bois récolté, car le laisser sur pied serait une erreur : il pourrirait sur place, produirait du méthane et relâcherait du CO₂. En appliquant le logigramme, il apparaît que plusieurs secteurs pourraient utiliser de façon pertinente la biomasse forestière : l'industrie pour la production de chaleur à haute température, en raison d'un déficit important actuellement comblé par le pétrole ou le gaz, et l'aviation pour les carburants durables. Je rappelle qu'il y a des obligations européennes d'incorporation de carburants durables, de biocarburants et de carburants de synthèse. Il faut donc produire des carburants durables. Or actuellement, les projets d'investissement en unités pilotes, quasi industrielles, de carburant pour l'aviation ne trouvent pas la ressource en biomasse, car celle-ci, en France, est utilisée en priorité pour le chauffage urbain. Celui-ci dispose pourtant d'alternatives de décarbonation, pas plus coûteuses, voire moins, que la biomasse, comme la géothermie, que j'ai déjà évoquée, ou les piles à combustible.

Il serait pertinent, dans les priorités d'usage de la biomasse solide, de prévoir l'arrivée des besoins de chaleur industrielle et de biocarburants.

Le même type de raisonnement montre que le biogaz a de multiples usages potentiels, mais il n'y a pas de stratégie autre que de l'injecter dans le réseau de gaz pour les usages domestiques, cuisson ou eau chaude sanitaire. On peut pourtant décarboner ceux-ci assez facilement, alors que d'autres usages sont beaucoup plus difficiles à décarboner.

Je pense par exemple au transport maritime. De grands armateurs comme CMA CGM convertissent progressivement leur flotte au gaz naturel pour sortir du pétrole. La façon la plus simple de décarboner sera ensuite de remplacer le gaz naturel par du biogaz. Encore faut-il en disposer. Le transport routier lourd ou le transport ferroviaire seraient également éligibles. Ces nombreux usages sont très largement supérieurs à la quantité raisonnable de biogaz que l'on pourra produire en France, soit environ 73 TWh. Il faudrait donc se donner de bonnes priorités pour son utilisation.

Pour la biomasse liquide, des questions sont sur la table, mais ne sont traitées par personne. Qu'advient-il des carburants de première génération, produits avec la betterave, le colza ou le maïs, quand il n'y aura plus de voitures à moteur thermique ? Retournera-t-on à de la production alimentaire ou fera-t-on d'autres carburants ? J'ai aussi évoqué les obligations d'incorporation pour les carburants de deuxième génération.

Les évaluations ainsi faites sont évidemment sujettes à des limites ; nous pourrions en parler si vous avez des questions.

Les recommandations visent à hiérarchiser les usages. Les usages énergétiques à considérer en priorité pour l'industrie sont la chaleur à haute température, les soutes maritimes et la production d'électricité de pointe. Nous aurons toujours besoin de turbines à gaz. Elles tourneront très peu, mais nous en aurons besoin. La façon la moins coûteuse de décarboner ces turbines sera d'utiliser le biogaz. D'autres usages ont, actuellement, une priorité de fait et il faudrait probablement les électrifier plutôt qu'utiliser de la biomasse.

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office. – Merci, cette présentation couvre des sujets qui sont au cœur des débats parlementaires chaque fois qu'il est question d'énergie et de mix énergétique. Ceci met en lumière la nécessité d'avoir un mix diversifié pour éviter d'être dépendant. Nous parlons beaucoup de dépendance et, par contraste, de souveraineté. La souveraineté énergétique n'existe pas totalement et nous voyons bien que la biomasse elle-même n'est pas non plus la poule aux œufs d'or. Une seule solution ne suffira pas, qu'elle soit renouvelable ou nucléaire.

Au moment de passer la parole à mes collègues pour des questions, je salue Lionel Duparay, député, qui a rejoint l'Office il y a deux semaines. Je salue également Philippe Bolo, un fidèle de l'Office depuis 2017, qui ne sera plus député dans quelques jours puisqu'il a été élu maire et qu'il a choisi d'exercer ce mandat.

M. Lionel Duparay, député. – Ma première question porte sur le bois d'œuvre. On parle beaucoup de l'exportation de grumes, ce qui a pour conséquence que le bois d'œuvre revient en France, mais pas les déchets associés. Ceci peut donc expliquer la nécessité de brûler des grumes, puisque nous manquons peut-être de déchets.

Ma deuxième question concerne la biomasse liquide et son transport. Il ne faudrait pas en arriver à déployer des efforts importants pour que l'énergie produite soit en définitive plus faible que celle consommée pour son transport. Le maillage territorial des outils de transformation et de production est donc important. Je me souviens d'un projet de production d'hydrogène à partir de biomasse pour lequel il fallait aller chercher la matière première dans un rayon de 200 à 250 kilomètres. Si c'est pour produire de l'hydrogène destiné à alimenter les camions qui vont chercher cette matière première, le bilan est très limité. Il y a une limite logistique au déploiement des solutions biomasse, tant pour l'importation des intrants que pour l'exportation de cette énergie.

M. Dominique Vignon. – Vous avez raison, il serait déraisonnable de transporter la biomasse, produit de faible densité énergétique, sur de grandes distances. Il ne faut pas accepter de mobiliser la biomasse si elle implique des transports trop importants ; c'est ce qui a été décidé pour le projet de Gardanne, qui a reposé successivement sur l'importation de biomasse canadienne ou américaine et sur l'utilisation de la biomasse française. Les forêts étant peu nombreuses autour d'Aix-en-Provence, il fallait de toute façon trouver la biomasse très loin, ce qui n'avait pas de sens. Je suis donc entièrement d'accord.

Il reste la concurrence entre la production de granulés et celle de carburant liquide. Actuellement, les granulés font l'objet de contrats de longue durée, à dix ou quinze ans, entre des coopératives et des usines de production. Certaines usines appartiennent même à des coopératives ; quand elles travaillent pour un propriétaire forestier, elles orientent ses produits vers leur usine de granulés. De ce fait, les entreprises qui veulent développer des biocarburants liquides de deuxième génération ne peuvent trouver la biomasse que très loin. Il y a là un conflit qui mériterait d'être résolu.

Concernant l'exportation de grumes françaises, nous ne disposons pas des déchets, mais nous en gardons une partie, comme le houpier. Il est vrai qu'un certain nombre de déchets de scierie nous échappent dans ces cas-là. Cela étant, l'exportation de bois est contrôlée.

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office. – Vous avez dit que la forêt française était plutôt bien exploitée, mais ce n'est pas toujours ce que l'on entend. On évoque notamment la multiplication des petits propriétaires forestiers privés, qui ne connaissent pas toujours les parcelles qu'ils possèdent et, par conséquent, ne les exploitent pas. Pouvez-vous nous éclairer sur ce point ?

M. Dominique Vignon. – Les deux assertions sont vraies. Je suis moi-même petit propriétaire forestier. Ma forêt est soumise à un plan de gestion, donc au-delà du seuil du « petit propriétaire » au sens réglementaire, et elle est mal exploitée, notamment parce que je ne suis pas très compétent, bien qu'une coopérative forestière s'en charge.

C'est donc vrai, et *a fortiori* pour des forêts de plus petite taille, le seuil du plan de gestion étant cependant passé de 25 à 20 hectares. Il existe même des propriétaires forestiers qui ne savent pas qu'ils le sont.

Toutefois, il y a aussi de grandes forêts, comme celles de l'Office national des forêts (ONF), ou les forêts appartenant à des collectivités territoriales. Au total, il y a beaucoup plus de forêts bien gérées que mal gérées.

Mme Dominique Voynet, députée. – Étant d'une région forestière, je tiens à souligner, monsieur Vignon, que compte tenu du morcellement de la forêt privée, vous êtes déjà un propriétaire important. C'est l'un des problèmes de la gestion de la forêt.

La capacité de stockage du carbone est en train de s'effondrer sur fond de changement climatique et de maladies qui y sont directement liées. Une partie de notre problème est aussi l'irrégularité des flux : selon l'état de la forêt, il y a des années où la capacité de stockage se maintient à peu près et d'autres où, au contraire, on abat beaucoup, avec un retour à des coupes rases sur des surfaces importantes. Le marché français n'est donc pas aussi mature que ce que vous avez décrit dans certains secteurs.

On voit également une très forte influence des choix politiques faits sous la pression d'intérêts économiques. Ce n'est pas un hasard si la France compte quelques groupes agro-industriels très puissants. Quand vous indiquez que la moitié de la consommation de biomasse liquide est importée, ces groupes jouent un rôle. Nous avons un problème de maturité industrielle et politique dans ce secteur.

J'ai lu avec beaucoup d'intérêt la tribune, déjà ancienne puisqu'elle date de juin 2022, que vous avez publiée dans *Le Monde*, dans laquelle vous exprimez de façon très stratégique et politique les enjeux actuels de la biomasse en France. Les parlementaires devraient s'en emparer, et je voulais vous en remercier.

M. Dominique Vignon. – Merci. Je ne peux que souscrire à ce que vous dites. Il y a un enjeu politique de premier ordre, sur lequel il ne m'appartient pas de trancher, mais qui vous concerne au premier chef. Poussant l'argument à l'extrême – et je vais peut-être plus loin que ce que vous avez dit –, la forêt n'est-elle pas un bien commun qui devrait être géré de

façon beaucoup plus directive que ce n'est le cas aujourd'hui ? La question est posée mais il ne m'appartient pas d'en discuter.

Mme Dominique Voynet, députée. – Vous l'avez suggéré, mais on peut le dire de façon plus frontale encore. Nos assemblées ont perdu un temps considérable à débattre d'une éventuelle réautorisation, à la demande des betteraviers, de l'usage des néonicotinoïdes. S'il s'agit en fait d'encourager une filière dont le bilan écologique est très contestable et dont l'intérêt pour notre autonomie énergétique doit être également discuté, alors, franchement, il faut que le débat politique soit mené de façon un peu plus courageuse qu'il ne l'est aujourd'hui.

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office. – Nous n'allons pas rouvrir ce débat. Nous aurons probablement l'occasion d'en parler lors de l'examen de la note scientifique préparée par Michaël Weber et Emeric Salmon, qui interviendront sur les néonicotinoïdes le 30 avril.

*
* *

Désignation de membres de la Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs (CNE2)

L'Office propose à la présidente de l'Assemblée nationale la reconduction de Mme Saida Laârouchi Engström et la désignation de M. Pierre Carlotti.

Il propose au président du Sénat de reconduire MM. Christophe Fournier et Philippe Gaillochet et de désigner Mme Anne-Catherine Dieudonné.

La réunion s'achève à 11 h 55.

Membres présents ou excusés

Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

Réunion du jeudi 16 avril 2026 à 9 h 35

Députés

Présents. - M. Lionel Duparay, Mme Dominique Voynet

Sénateurs

Présents. - Mme Martine Berthet, M. Stéphane Piednoir, M. Bruno Sido