

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

- **Examen** de la note scientifique sur la géoingénierie (*Maxime Laisney, député, Stéphane Piednoir, sénateur, rapporteurs*).....2
- **Examen** de la note scientifique sur le Futur collisionneur circulaire (FCC) (*Dominique Voynet, députée, Anne-Catherine Loisier, sénatrice, rapporteuses*).....12

Jeudi 16 octobre 2025
Séance de 9 heures 30

Compte rendu n° 214

SESSION ORDINAIRE DE 2025-2026

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



Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

Jeudi 16 octobre 2025

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

La réunion est ouverte à 9 h 35.

Examen de la note scientifique sur la géoingénierie (*Maxime Laisney, député, Stéphane Piednoir, sénateur, rapporteurs*)

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office. – Mes chers collègues, je vous souhaite la bienvenue. L'ordre du jour de notre réunion d'aujourd'hui prévoit l'examen de deux notes scientifiques.

La première, relative à la géoingénierie, a été élaborée par mon collègue Maxime Laisney et moi-même.

M. Maxime Laisney, député, rapporteur. – En juin 2025, une étude¹ réalisée par plusieurs scientifiques, dont des membres du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), montrait que l'objectif fixé par l'Accord de Paris de 2015, visant à limiter le réchauffement climatique à 1,5 degré par rapport au niveau de l'ère préindustrielle, n'était plus atteignable. Le budget carbone résiduel, c'est-à-dire la quantité d'émissions à ne pas dépasser pour conserver plus de 50% de chances de limiter le réchauffement planétaire à 1,5 degré, est presque épuisé. Au rythme actuel, il ne correspond plus qu'à trois années d'émissions. Cette étude montrait aussi que les températures augmentent à un rythme sans précédent.

Au niveau français, le Citepa, qui comptabilise les émissions de gaz à effet de serre, vient d'annoncer que les émissions n'ont pas ou n'ont que très peu baissé au premier semestre de 2025 et que la tendance devrait se poursuivre. On est donc très loin de la baisse annuelle de 5 % nécessaire pour respecter les objectifs de la France pour la période 2022-2030. Le Citepa rappelle que ces émissions sont produites par l'activité humaine et que celles résultant de l'activité de raffinage de pétrole ont augmenté de 14 % en 2025, à rebours de la diminution souhaitée par rapport à l'année précédente. À cela s'ajoute l'augmentation de 6 % des émissions liées aux engrains minéraux et azotés. Ce tableau montre que le mur est déjà devant nous, tandis que les efforts de planification de sobriété, d'efficacité, d'électrification des usages et des processus de production font défaut.

La tentation est grande d'enterrer le problème, ce qui est une expression tout à fait adaptée au regard des techniques de captage et de stockage du carbone proposées. Certains, tels les dirigeants des industries fossiles, premières responsables du réchauffement, y voient l'opportunité de proposer des solutions techniques qui sont souvent un moyen de poursuivre

¹ Forster, P. M. et al. (2025). Indicators of Global Climate Change 2024: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence. *Earth System Science Data*, 17, 2641-2680.

<https://doi.org/10.5194/essd-17-2641-2025>

l'extraction du pétrole jusqu'à la dernière goutte ou l'extraction du gaz jusqu'au dernier mètre cube, et de trouver de nouveaux débouchés. Il s'agit pourtant d'un pari qui pose plusieurs problèmes. Il entraîne d'abord une situation d'aléa moral, en portant atteinte aux efforts d'incitation à la sobriété et à l'efficacité énergétiques. À cela s'ajoute le risque de verrouillage sociotechnique, puisque si nos sociétés s'engagent dans ces techniques, elles sont condamnées à les mettre en œuvre indéfiniment, à défaut d'efforts par ailleurs. Enfin, la plupart des solutions proposées sont énergivores et coûteuses, donc difficiles à déployer à grande échelle.

La définition communément admise de la géoingénierie est la manipulation délibérée à grande échelle de l'environnement planétaire visant à contrecarrer le changement climatique d'origine anthropique. Certains traitent ses promoteurs d'apprentis sorciers cherchant à réparer les bêtises commises par l'humanité depuis quelques décennies ; je m'inscris dans cette critique.

Le concept de géoingénierie regroupe deux grandes catégories de techniques. Stéphane Piednoir présentera celles relevant de la gestion du rayonnement solaire, puis je vous décrirai les techniques d'extraction du dioxyde de carbone.

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur. – L'Académie des sciences a publié sur le sujet un rapport² objectif, non teinté d'idéologie et marqué par la confiance en la science qui doit aussi nous habiter. C'est l'approche que nous avons retenue pour cette note scientifique de l'Office.

Je n'utiliserais pas l'expression d'apprenti sorcier, car elle pourrait aussi qualifier tous ceux qui ont fait d'importantes découvertes par hasard. Cela n'empêche pas d'avoir un regard, sinon critique, du moins sérieux sur les enjeux, les impacts et les risques des techniques de géoingénierie, tout en mettant en valeur leurs bénéfices éventuels.

Les deux grandes catégories de géoingénierie n'ont ni les mêmes enjeux, ni les mêmes problématiques, ni les mêmes impacts, ni les mêmes coûts financiers et énergétiques, mais nous avons souhaité les étudier ensemble, car si leurs acteurs sont différents, elles ont pour objectif commun d'atténuer le réchauffement climatique.

La première grande catégorie est la gestion, ou modification, du rayonnement solaire (GRS). Elle vise à modifier le bilan radiatif de la Terre, c'est-à-dire les conditions d'équilibre entre l'énergie absorbée par le système terrestre et celle réémise dans l'espace. L'énergie solaire incidente étant un terme principal de ce bilan, il paraît logique de vouloir réduire son potentiel de réchauffement. Agir directement sur le rayonnement solaire éviterait d'avoir à réduire les émissions de gaz à effet de serre, mais présenterait l'inconvénient de créer un état physique de la Terre gouverné par de nouveaux paramètres. Cela n'éliminerait en aucun cas la cause du problème, c'est-à-dire la concentration atmosphérique de CO₂ : c'est l'une des controverses qui s'attache à cette catégorie d'actions.

Certaines techniques, dont le bien-fondé reste actuellement hypothétique, font l'objet de recherches, sachant que, par définition, l'issue d'une recherche ne peut être déterminée à l'avance. La plus connue, l'injection d'aérosols stratosphériques (IAS), consiste à disperser dans la haute atmosphère, entre 15 et 25 kilomètres d'altitude, des aérosols composés de

² Académie des sciences. *Géo-ingénierie climatique : état des lieux scientifique, enjeux et perspectives.* 2 octobre 2025.

particules choisies pour réfléchir vers l'espace une partie du rayonnement solaire avant qu'il n'atteigne la Terre et obtenir un effet refroidissant ou de moindre réchauffement. Il deviendrait ainsi possible d'abaisser rapidement d'un à plusieurs degrés la température moyenne globale à la surface de la Terre. Ce phénomène est souvent comparé à celui des éruptions volcaniques, dont les poussières émises dans l'atmosphère réduisent le rayonnement solaire arrivant jusqu'au sol, provoquant un assombrissement de l'environnement et une diminution des températures.

Néanmoins, des modélisations plus fines et des observations plus précises montrent les limites de cette analogie. Les particules envoyées dans l'atmosphère sont des sulfates dont la chimie est relativement maîtrisée. En revanche, pour disperser ces particules à une hauteur nettement supérieure à l'altitude de croisière des vols long-courriers, il faudrait disposer d'un grand nombre d'avions capables d'atteindre la stratosphère, chargés de plusieurs tonnes de sulfates. Il faudrait répéter l'opération périodiquement car les sulfates ont une durée de vie dans la stratosphère d'environ deux ans, au-delà de laquelle ils retombent sur Terre, avec le risque collatéral de provoquer des pluies acides.

Un autre inconvénient est l'atteinte à la couche d'ozone, que l'on a réussi à rétablir après des alarmes justifiées. J'ai connu des décennies où d'aucuns affirmaient que la couche d'ozone ne se reconstituerait jamais, mais des mesures ont permis de résoudre le problème. En outre, l'effet des aérosols sur le réchauffement devrait être peu homogène et provoquer des perturbations du système hydraulique terrestre aux conséquences graves, sur la mousson asiatique, par exemple.

À ce stade des recherches et modélisations, un déploiement à grande échelle des techniques de gestion du rayonnement solaire semble exposer à des risques supérieurs aux bénéfices attendus. En particulier, cela ouvre la voie à l'hypothèse d'un choc terminal : comme l'évoquait Maxime Laisney, une fois le processus enclenché, interrompre la mise en œuvre de ces techniques provoquerait une remontée rapide des températures par une sorte d'effet rebond brutal.

Des pays très émetteurs de CO₂ comme les États-Unis et le Canada sont les premiers investisseurs dans ces techniques. Cela peut s'entendre comme une volonté d'agir, mais aussi comme un prétexte pour continuer à employer les énergies fossiles. Sans épiloguer sur les orientations de certains chefs d'État, c'est un sujet qu'ils prennent à bras-le-corps, au prix d'investissements colossaux. Ces méthodes sont peu développées en Europe, *a fortiori* en France. Elles font l'objet de nombreux rapports et avis défavorables, lesquels recommandent de concentrer les efforts sur la modélisation de leurs impacts et sur leur surveillance, plutôt que sur leur déploiement effectif.

M. Maxime Laisney, député, rapporteur. – Le deuxième ensemble de techniques de géoingénierie est regroupé sous l'appellation d'extraction du dioxyde de carbone (EDC). Les océans et les plantes absorbent naturellement la moitié de nos émissions de gaz à effet de serre, il faudrait traiter l'autre moitié afin de les éliminer. Pour ce faire, il existe deux grandes techniques d'extraction du dioxyde de carbone : le captage et stockage, et la foresterie, qui comprend la reforestation et l'afforestation.

La reforestation consiste à replanter sur des zones précédemment déforestées. L'afforestation vise à transformer en surfaces forestières des surfaces qui ne l'étaient pas ; elle crée une concurrence d'usage des sols. Selon une étude³, au regard des engagements de 194 États pris dans le cadre de l'Accord de Paris sur le climat, il faudrait planter de nouveaux arbres sur un quart des terres arables, en concurrence avec les cultures alimentaires. Et comme la capture par foresterie est plus efficace dans les zones tropicales, une question éthique se pose : doit-on y planter des arbres pour absorber les émissions de gaz à effet de serre des pays du Nord ? La foresterie connaît par ailleurs deux limites : d'une part, le bilan de la captation du carbone d'une forêt n'est positif que durant sa croissance, après quoi les échanges gazeux se compensent ; d'autre part, le réchauffement climatique réduit la capacité des arbres à absorber le dioxyde de carbone.

Nous avons étudié les trois techniques de captage et stockage pour lesquelles les investissements sont les plus élevés. La première est le captage et séquestration du carbone (CSC) en sortie d'usine. Elle n'engendre pas d'émissions négatives, puisqu'elle ne retire pas de dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère, mais qu'elle évite d'en émettre davantage. Grâce à des filtres et des solvants absorbeurs placés à la sortie des cheminées, le dioxyde de carbone est capté avant son relâchement dans l'atmosphère. Il faut ensuite le transporter et le stocker de façon pérenne, pour des milliers d'années. Or les technologies de captage, stockage et valorisation (CCUS) impliquent souvent une réémission. Par exemple, le CO₂ capté puis transformé en biocarburant revient dans l'atmosphère. En outre, ces techniques sont très énergivores, coûteuses et non exemptes de risque de fuites. Selon l'ADEME, elles doivent être réservées à la compensation des émissions de gaz à effet de serre (GES) dites incompressibles, résultant d'industries indispensables dont on ne sait pas décarboner les processus de production. Elles sont donc le dernier levier à actionner, derrière les autres méthodes de décarbonation.

La deuxième technique de captage et stockage, dite « bioénergie avec capture et stockage du dioxyde de carbone » (BECSC), consiste à intégrer des techniques de captage et stockage à des centrales à biomasse. On fait pousser des arbres que l'on brûle pour produire de l'énergie et on installe un filtre en sortie de cheminée afin de capter le CO₂. En ce cas, les émissions sont négatives, puisqu'au cours de sa croissance, la biomasse brûlée aura capté du CO₂ présent dans l'atmosphère. Mais de même que pour la foresterie, le besoin de réservrer des terres aux arbres crée une concurrence pour l'usage des terres avec les activités agricoles.

La troisième technique est la capture directe dans l'air avec séquestration (CDAS, ou DAC en anglais). Le captage du CO₂ n'est plus réalisé en sortie de cheminée mais directement dans l'air. La contrainte du lieu et la difficulté du transport disparaissent, mais la concentration de CO₂ dans l'atmosphère reste trop faible pour assurer un rendement intéressant. Extraire ce CO₂ de l'air ambiant est très énergivore et fortement consommateur en eau. Les rendements sont ainsi bien plus faibles qu'avec un filtre en sortie de cheminée. Les prototypes actuels, qui mettent en œuvre ces techniques peu matures ne compensent pas leurs propres émissions. Très coûteux, leur déploiement ne serait pas significatif avant 2050.

Les techniques d'extraction du dioxyde de carbone sont présentes dans la quasi-totalité des scénarios du GIEC. Toutefois, elles affichent un faible rapport efficacité / coût, par exemple très inférieur à celui du développement des énergies renouvelables. C'est pourquoi

³ Dooley, K., et al (2024). Over-reliance on land for carbon dioxide removal in net-zero climate pledges. *Nature communications*, 15(1), 9118. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-53466-0>

les scientifiques invitent à ne pas trop compter sur elles pour résorber un éventuel dépassement des températures-cibles identifiées dans les engagements internationaux. Une évaluation de leur efficacité relative conduirait à prioriser parmi ces techniques la foresterie et la BECSC. La CDAS n'est en revanche pas retenue dans les scénarios en raison de sa maturité insuffisante. Ne vaudrait-il pas mieux consacrer l'énergie nécessaire au fonctionnement de ces gros extracteurs de CO₂ à la décarbonation du transport, du tertiaire et de l'industrie ?

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur. – Je rappelle que nous avons profité de notre déplacement en Norvège, l'an dernier, quand ce pays présidait le réseau des offices scientifiques européens (EPTA), pour visiter un site expérimental de stockage de CO₂ en mer du Nord.

La gouvernance internationale de l'extraction du CO₂ atmosphérique et de la gestion du rayonnement solaire reste embryonnaire. Une expérimentation de GRS à grande échelle dans un pays aurait une incidence sur les pays voisins, voire au-delà, et pourrait être lourde de conséquences. Les effets de la GRS seraient probablement peu homogènes à la surface du globe. La géoingénierie peut ainsi devenir un sujet de géopolitique relevant de la défense nationale, puisqu'un pays qui agirait sur son espace en imposerait les conséquences aux pays voisins. Une partie de la recherche en modélisation vise à déterminer la source d'une éventuelle expérience de GRS dans le but d'attribuer les responsabilités en cas de conséquences néfastes. Le droit international est quasiment inexistant sur le sujet, puisque seule l'utilisation de la GRS à des fins militaires est interdite à l'échelle planétaire. Cela laisse à des acteurs privés ou académiques la liberté de conduire des expériences limitées de géoingénierie.

L'élimination du CO₂ par des méthodes d'extraction de carbone aux effets négatifs globaux est un peu plus régulée que la GRS. En particulier, l'EDC marine fait l'objet d'un moratoire. Cette décision internationale très spécifique fait suite à des expériences de fertilisation des océans qui, alors qu'elles étaient censées montrer une augmentation de leurs capacités de captage de CO₂, ont plutôt révélé les dangers et l'inefficacité globale de cette démarche.

La poursuite du réchauffement climatique peut rendre opportunes des recherches scientifiques sur l'élimination du CO₂ et séduisantes les différentes options ouvertes par la géoingénierie. S'il convient de ne pas brider les initiatives, la plus grande prudence s'impose sur la plupart des techniques connues. Ni les techniques de GRS ni les techniques d'élimination du CO₂ ne sont exemptes de conséquences indésirables. Si les effets quasi rédhibitoires de la GRS ont motivé des moratoires en Europe, l'EDC apparaît plus à même d'intégrer à terme la gamme des moyens de lutte contre le réchauffement climatique, et son acceptabilité internationale semble plus ouverte. Mais elle doit rester une solution de dernier recours, puisque son efficacité se réduit à mesure de l'augmentation de la quantité de CO₂ que l'on continue de produire et qu'il faudrait éliminer à proportion. Alors que la capacité de stockage du projet Northern Lights en mer du Nord est de 1,5 million de tonnes de CO₂ par an, la France en émet annuellement 400 millions de tonnes à elle seule ! Cette technique non mature ne permet donc pas encore de répondre aux enjeux climatiques.

Mme Anne-Catherine Loisier, sénatrice, vice-présidente de l'Office. – Il serait pertinent de mettre en regard des 6,7 millions d'hectares de forêts primaires détruits les millions d'hectares de forêt nouveaux qui apparaissent sur la planète. En France, la forêt

s'étend. Elle couvre près de 18 millions d'hectares du territoire métropolitain, au lieu de 15 millions d'hectares il y a une dizaine d'années.

Dire que la croissance des forêts finit par s'arrêter, c'est comme dire que la démographie pourrait s'arrêter. Des arbres meurent tandis que d'autres naissent et grandissent. Le bilan carbone peut varier, par exemple du fait de déperissements massifs dans certaines forêts, mais grâce à une gestion adaptée des plantations, il est possible d'optimiser le bilan carbone. Nombre de pays plantent massivement. En France, nous plantons laborieusement 60 millions d'arbres par an, quand l'Allemagne en plante 300 millions, sans parler de la Chine ou de la Russie. Il serait intéressant de voir où nous en sommes par rapport à l'Europe ou au reste du monde. En France, 3 millions d'hectares agricoles ne sont pas valorisés, notamment dans certaines régions de l'Est, en Bretagne et en Normandie. J'ai rencontré de nombreux forestiers qui aspirent à planter davantage. En outre, des efforts restent à faire pour la séquestration du carbone dans les haies.

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur. – Nous ne voulions pas dire que la croissance des forêts s'arrêtait, mais que la capture de CO₂ par un arbre était active durant sa croissance, puis s'arrêtait ou restait limitée.

Je retiens l'idée de mettre en miroir le nombre d'hectares détruits ou coupés avec le nombre d'hectares plantés à l'échelle planétaire.

M. Maxime Laisney, député, rapporteur. – Planter plus d'arbres en France remet en cause le modèle économique agricole. Après avoir grandi dans le bocage, je suis pleinement partisan de planter des haies, mais en Seine-et-Marne, j'en vois beaucoup moins. Les champs sont bien plus vastes et l'on n'y pratique pas les mêmes cultures. Je suis d'accord pour planter des haies et replanter des forêts, mais il faut cesser d'artificialiser les sols et être attentif aux espèces d'arbres plantés. La note appelle à tenir compte des limites planétaires. Lutter contre le réchauffement climatique ne doit pas empêcher d'être aussi attentif à la biodiversité.

Mme Dominique Voynet, députée. – La concurrence dans l'usage des sols revêt plus d'acuité dans d'autres parties du monde qu'en France. Si la priorité est de nourrir les êtres humains, la déforestation est-elle justifiée pour produire de l'huile de palme ? C'est aussi un débat politique. Les forêts elles-mêmes souffrent du changement climatique et leur capacité à stocker du carbone s'est effondrée d'un quart en une vingtaine d'années. C'est un sujet en soi.

À quelques jours de la 30^e Conférence des parties organisée à Belém, comment le sujet est-il abordé au niveau international ? La convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) confie-t-elle au seul secteur privé le soin de traiter ces sujets scientifiques ? Existe-t-il une coordination internationale et si c'est le cas, avec quels groupes d'États ? Ces recherches sont-elles civiles ou militaires ou les deux, et si oui, comment sont-elles financées ? Les outils dont nous disposons sont-ils à la hauteur de ce grave enjeu pour l'humanité ?

M. Maxime Laisney, député, rapporteur. – Présenter notre étude en quatre pages était une gageure. C'est pourquoi le propos est enrichi de nombreuses notes.

Il est bien indiqué que le réchauffement climatique limite la capacité de stockage et d'absorption du CO₂ par les forêts.

J'ai pointé le fait que le financement de la géoingénierie découle notamment de la volonté des industries fossiles de se « verdir » tout en trouvant de nouveaux débouchés.

Nous avons abordé brièvement la nécessité de règles de gouvernance internationale. Des tentatives d'autorégulation par les acteurs de la géoingénierie ont été menées, débouchant notamment sur les « principes d'Oxford ». Ceux-ci restent malheureusement non contraignants, de même que le moratoire international relatif aux techniques de fertilisation des océans. Il n'existe aucun moyen de contraindre les États à le respecter.

Les principes d'Oxford sont également destinés à répondre au principe rappelé par Mme Deprez, chercheuse à l'Institut du développement durable et des relations internationales (Iddri), selon lequel « l'extraction du dioxyde de carbone réaliste et faisable est une ressource limitée et un bien commun ». La recherche doit mesurer les limites et les effets de toutes ces techniques, quand d'autres, sociétés privées jouant les apprentis sorciers ou États, voudraient prendre des initiatives. D'un point de vue réaliste et en tenant compte de leur faisabilité, ces techniques étant une ressource limitée et un bien commun, c'est à la puissance publique de s'en emparer.

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur. – Nous nous heurtons à l'absence de gouvernance internationale. La France est plutôt vertueuse en matière de forêt, mais nous pourrons toujours multiplier les déclarations de bonne volonté à l'échelle de notre pays, voire de l'Europe, il restera illusoire de vouloir résoudre à nous seuls les problèmes de la planète.

Je réfute à nouveau les termes d'apprenti sorcier. Si les investissements massifs réalisés par Total Énergies pour le stockage du carbone en mer du Nord ne sont pas une réponse globale au réchauffement climatique, ils sont intéressants à observer et ne coûtent rien au contribuable. Quant aux usages du CO₂, ils peuvent se développer à une échelle très locale, par exemple lorsque le captage s'effectue à proximité de serres agricoles, comme c'est le cas dans mon département.

M. Daniel Salmon, sénateur. – Nous devons creuser les pistes scientifiques tout en restant lucides et prudents, car elles peuvent provoquer une démobilisation de nos concitoyens, persuadés que la solution est pour demain. Il faut sans doute pour cette raison intégrer les sciences humaines aux réflexions sur ce sujet.

Si la croissance de l'arbre finit par ralentir, le sol de la forêt continue de se couvrir d'une accumulation de déchets organiques formant un puits de carbone quantifiable. Par ailleurs, le bois d'œuvre permet de faire croître une forêt en stockant le carbone. Les prairies sont un autre moyen de stockage. La directive RED II fixe pour objectif une augmentation de 4 % de la teneur en CO₂ du sol. J'ajoute à ce tableau l'effet de la préservation des zones humides.

La gouvernance mondiale est indispensable, d'autant plus si l'objectif est d'agir sur le climat global de la planète. On imagine les dégâts provoqués par l'envoi de particules dans l'atmosphère par un seul État jouant l'apprenti sorcier, sans concertation.

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur. – Vous n'avez pas parlé des haies !

M. Daniel Salmon, sénateur. – De fait, les haies continuent de disparaître. Elles sont pourtant une forêt linéaire qui permet le stockage du carbone et rend un grand nombre de services environnementaux. Elles sont un élément déterminant de la transition agricole et de la captation de carbone. Il faut inverser la tendance à l'arasement des haies et préserver l'existant. Chaque fois qu'on coupe un arbre qui a mis cinquante ans à pousser pour en faire des bûches, c'est du carbone remis dans l'atmosphère et le bilan est loin d'être neutre. En revanche, une gestion du bois-énergie au moyen de rotations courtes est intéressante. Tout non-recours à de l'énergie fossile est un gain.

M. Arnaud Saint-Martin, député. – Il convient de faire un bilan critique, lucide et réflexif de ces technologies. À cet égard, les sciences humaines aussi ont beaucoup à apporter. Beaucoup de travaux ont été menés depuis de nombreuses années, y compris en histoire des sciences. Je pense notamment aux recherches de Clive Hamilton.

Je me posais la question des modèles économiques qui encouragent, acclimatent et stimulent ces promesses techniques. Dans la note, vous évoquez la nécessité d'analyser de façon critique les modèles d'affaires, qui devraient être robustes pour engager l'effort budgétaire ou les investissements publics ou privés. Des startups investissent. D'où viennent les fonds ? Quelles sont les attentes des investisseurs ? Vous avez mentionné les industries fossiles, mais il y a aussi des acteurs du capital investissement et du capital-risque. Peut-être aussi de la Silicon Valley ? Quelles sont les attentes dans ce domaine ? Y-a-t-il co-construction avec l'action publique ? Des centrales solaires orbitales suscitent l'enthousiasme techno-scientifique et sont soutenues par la puissance publique. L'agence spatiale britannique a investi dans le projet Solaris, financé de façon résiduelle par l'Agence spatiale européenne. Le gouvernement britannique parie sur de gigantesques panneaux solaires en orbite pour aider à atteindre la neutralité carbone en 2050. Quid des investissements privés-publics, y compris sur ces projets relevant quasiment de la science-fiction ?

Des milliards de dollars sont potentiellement engagés sur les marchés de la séquestration du carbone. Quelles sont les perspectives à horizon de dix ans de cette « économie des promesses » en ce domaine ?

M. Maxime Laisney, député, rapporteur. – Parmi les personnes que nous avons sollicitées, il y avait des scientifiques et d'autres responsables intéressés par le développement de ces techniques, notamment M. Delerce, de l'ONG Carbon Gap. Financé par Quadrature Climate Foundation et Carbon to Sea Initiative, ce fonds d'investissement détient 170 millions de dollars de participations dans des entreprises du secteur des énergies fossiles.

L'origine des financements n'a pas été l'angle d'approche principal de notre étude. Nous avons plutôt examiné la maturité des différentes technologies, leurs avantages et leurs inconvénients. Mais nous avons pu entendre que les entreprises du secteur cherchent à développer une sorte de second marché carbone, le prix de la tonne de CO₂ sur le marché carbone actuel étant encore trop faible pour rendre leurs technologies compétitives. Pour une industrie incapable de décarboner ses procédés de production, il est actuellement bien moins coûteux d'acheter des crédits carbone par le système d'échange de quotas ETS que de s'engager dans les techniques de captage et de stockage.

M. Gérard Leseul, député, vice-président de l'Office. – Outre le projet Northern Lights en mer du Nord, le projet norvégien Longship vise à capter le CO₂ d'une cimenterie. Au-delà du modèle économique de ces systèmes, il y a leur réalité technique. Nous avons visité le site à quai, mais les captages s'effectuent à des centaines de kilomètres en mer du

Nord. Quelles sont les réalités de ces captages aujourd’hui, et quel est leur modèle économique ?

Au-delà des aspects scientifiques, le principal défi est l’organisation de la gouvernance internationale. Il aurait été intéressant de formuler quelques recommandations. Nous pourrions nous-mêmes proposer les modalités de sa mise en place.

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l’Office. – Nous l’évoquons en creux et le format de la note scientifique n’invite pas forcément à faire des recommandations.

L’expérimentation norvégienne n’est nullement à l’échelle de ce qu’il conviendrait de faire. Cela ne couvrirait pas les besoins de la Norvège, et encore moins de l’Europe, en stockage de carbone.

Je salue les efforts des cimentiers. Dans l’empreinte carbone d’un parpaing ou d’un béton produit en France, des progrès considérables ont été réalisés depuis dix à quinze ans. On continue à alimenter le stock de CO₂ dans l’atmosphère, mais on réduit les émissions.

On peut critiquer toutes les entreprises privées, notamment pétrolières, mais les vrais responsables des dérèglements climatiques, ceux qui les nient et font obstacle à l’instauration d’une gouvernance internationale ne sont pas des entreprises privées, mais des chefs d’État, en particulier Donald Trump. Je me réjouis qu’un fleuron français comme Total Énergies réalise des bénéfices et investisse dans des technologies innovantes qui n’aboutiront peut-être pas. En revanche, le blocage international par la décision d’un seul homme montre bien les limites de l’exercice.

M. Maxime Laisney, député, rapporteur. – Un chef d’État qui entretient des liens plus qu’étroits avec le monde de l’industrie et de la finance !

La note de fin n° 47 rappelle qu’une étude de l’ADEME estime les capacités de stockage françaises à 1,1 gigatonne dans les structures géologiques fermées et à 3,6 gigatonnes dans des aquifères salins, soit près de 5 gigatonnes, pour des émissions annuelles de la France estimées à 0,4 gigatonne. Le potentiel français représente donc une grosse dizaine d’années d’émissions. Il existe toutefois un écart entre ce potentiel théorique et ce que pourraient être les capacités réelles de stockage du carbone, une fois pris en compte l’effet du transport et des conditions physiques, financières et industrielles à remplir. Même quand une technique est mature et pas trop coûteuse, si nous continuons à émettre du CO₂, nous ne saurons plus quoi en faire.

Des scientifiques auditionnés nous ont alertés sur le fait qu’en retirant du sol des énergies fossiles pour les brûler, le CO₂ se retrouve dans l’écosystème global intégrant l’atmosphère, la biosphère et les océans. Un équilibre s’établit en permanence entre le CO₂ stocké dans les océans et celui stocké dans l’atmosphère. Si l’on retire du CO₂ de l’atmosphère, les océans qui avaient absorbé une partie du CO₂ en relargueront dans l’atmosphère pour maintenir cet équilibre. Il n’est donc d’autre solution que l’efficacité, la sobriété et la décarbonation des usages et des procédés de production. Entre la maturité technologique, le coût, le caractère énergivore et le potentiel de mise à l’échelle, il ne faut pas faire croire aux gens qu’il existe des solutions pour continuer comme avant.

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur. – Ce n'est pas une note ou un rapport sur la fin du dérèglement climatique. Nous traitons de la géoingénierie, un de ses aspects technologiques et scientifiques. J'ai considéré qu'on devait y intégrer la foresterie, parce qu'à grande échelle, elle peut constituer une voie pour stocker moins de CO₂ dans notre atmosphère. J'ai rédigé, avec Olga Givernet, un rapport sur la sobriété énergétique⁴, mais c'est un autre sujet. Imaginait-on pouvoir fabriquer un jour des batteries offrant 700 kilomètres d'autonomie à un véhicule électrique ? Au moment où les premières voitures à moteur thermique sillonnaient nos routes, il y a un siècle, imaginait-on aller sur la Lune grâce au même mode de propulsion ? En avançant, la science découvre souvent des techniques auxquelles on ne s'attendait pas.

L'hostilité à la gestion du rayonnement solaire fait consensus, compte tenu de ses potentiels effets collatéraux sur l'ensemble de la planète. En revanche, la capture du carbone relève du niveau local. La technique n'est pas encore à l'échelle mais il ne serait pas sérieux de la rejeter définitivement pour des motifs déraisonnables.

Mme Anne-Catherine Loisier, sénatrice, vice-présidente de l'Office. – Outre la séquestration dans les forêts, il y a la séquestration dans le matériau bois, en forme de substitution. La logique de la réglementation environnementale RE 2020 visant à favoriser les matériaux biosourcés dans l'usage quotidien ouvre la voie à d'énormes marges de progression.

Je réfute l'idée selon laquelle il y a beaucoup de forêts et qu'on ne pourra pas aller plus loin. Je n'ai jamais vu un tel accroissement des forêts, chiffré en milliards d'arbres, sur l'ensemble de la planète. L'Inde a planté 2,5 milliards d'arbres, l'Éthiopie, 2 milliards d'arbres ; le Mexique, la Turquie, le Pérou... tout le monde plante. Il serait intéressant d'observer cette évolution massive sur l'ensemble de la planète, sans précédent depuis quarante ans.

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office, rapporteur. – Nous ajouterons à la note une mise en perspective chiffrée des surfaces plantées avec les 6,5 millions d'hectares supprimés au niveau planétaire.

M. Daniel Salmon, sénateur. – Lorsque l'on détruit un arbre centenaire et qu'on en plante un aujourd'hui, le bilan est très négatif.

La note scientifique sur la géoingénierie est adoptée à l'unanimité.

⁴ Olga Givernet et Stéphane Piednoir. *Rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. Les implications en matière de recherche et d'innovation technologique de l'objectif de sobriété énergétique.* 27 juin 2023.

Examen de la note scientifique sur le Futur collisionneur circulaire (FCC) (Dominique Voynet, députée, Anne-Catherine Loisier, sénatrice, rapporteures)

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office. –Dominique Voynet, et Anne Catherine-Loisier vont maintenant présenter la note scientifique sur le projet de « futur collisionneur circulaire » (FCC) du CERN qu’elles ont élaborée.

Mme Dominique Voynet, députée, rapporteure. – Cette note n’a pas pour objectif de faire de ses lecteurs des experts de la physique des particules, mais de nous aider à comprendre les enjeux scientifiques majeurs du projet de « futur collisionneur circulaire » (FCC) de l’Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN).

Nous nous sommes appuyées sur l’excellente note scientifique n° 12 de l’Office, publiée en 2019, qui traitait des grands accélérateurs de particules ; nous en avons d’ailleurs auditionné le rapporteur, Cédric Villani.

La physique des particules traite des constituants fondamentaux de la matière, des briques plus petites que les noyaux des atomes, plus petites même que les protons et neutrons qui les composent. Le modèle standard, qui est la théorie la plus aboutie du domaine, constitue une sorte de bestiaire des différentes particules élémentaires composant la matière ordinaire. On y trouve les quarks qui, en s’assemblant, forment les protons et les neutrons. On y trouve aussi des particules plus connues, comme les électrons, et d’autres encore plus obscures telles que les gluons. Je vous invite à consulter la note de fin n° 7 qui en fournit le détail.

Pour observer ces particules, il faut passer à une échelle plus petite que l’échelle atomique et « zoomer ». Pour voir aux petites échelles, le principe général consiste à monter en énergie. Pour ce faire, les « microscopes » que les physiciens des particules utilisent sont des collisionneurs de particules. Dans ces machines de grande ou de très grande taille, les particules sont accélérées à des vitesses proches de celle de la lumière. Les champs électromagnétiques créés dans les collisionneurs leur communiquent une très grande énergie qui est libérée dans une collision avec d’autres particules. C’est en observant ces collisions qu’on peut détecter des particules élémentaires.

Les physiciens ont ainsi pu valider expérimentalement l’existence du boson de Higgs, une des particules élémentaires du modèle standard. La découverte a eu lieu en 2012, grâce au Large Hadron Collider, (LHC), le collisionneur emblématique du CERN, dont le programme d’expériences n’est pas censé aller au-delà de 2040.

Pour atteindre les énergies permettant la production du boson de Higgs, il faut un instrument suffisamment grand. Il est plus facile de faire tourner des particules dans un anneau à vitesse élevée si l’anneau est plus grand. Avec 27 kilomètres de circonférence, le LHC est actuellement le plus grand collisionneur au monde.

Les physiciens ont recherché la dernière particule prévue par la théorie. Après la découverte du boson de Higgs, en 2012, ils considèrent que le modèle standard est désormais complet. Cela ne signifie pas la fin de la recherche en physique des particules, mais l’ouverture d’un nouveau champ de recherche, l’étude du boson de Higgs lui-même. Cette particule qui donne leur masse aux particules élémentaires reste mal connue. Sa masse, notamment, est encore très incertaine. Les physiciens souhaitent donc disposer des moyens de mieux l’étudier.

On est là dans le champ d'une recherche très fondamentale, difficile à comprendre par les non-initiés. Au fil de nos auditions et au cours de notre visite au CERN, nous avons mesuré l'engouement des chercheurs pour ces sujets de physique fondamentale, mais ils nous ont semblé éprouver eux-mêmes des difficultés à prendre le recul nécessaire pour expliquer réellement ce qu'ils comptaient faire de l'analyse détaillée du boson de Higgs.

Il est incontestable que la physique des particules pourrait ouvrir des pistes pour résoudre certaines des plus grandes énigmes de la physique moderne. On nous a souvent parlé de la matière noire supputée par les astronomes et que le modèle standard n'explique pas. Il reste cependant difficile d'évaluer avec certitude ce que des progrès dans la caractérisation du boson de Higgs apporteraient à la résolution de ces questions. C'est une problématique intrinsèquement liée au caractère fondamental de ces recherches.

Les physiciens, sollicités dans le cadre d'un processus d'agrégation des besoins des scientifiques européens, ont exprimé le souhait de disposer d'un instrument qui serait une sorte d'usine à Higgs, produisant des bosons en quantité suffisante pour pouvoir les étudier précisément. Le CERN a alors proposé un projet de futur collisionneur circulaire (FCC). Pour répondre à ces besoins, il serait trois fois plus grand que le LHC et produirait des milliards de bosons de Higgs.

Le projet de FCC comporte deux phases. La première serait une phase de haute précision. Les faisceaux entrant en collision seraient constitués d'électrons et de positons, les particules d'antimatière correspondant aux électrons, d'où son nom de FCC-ee. Les collisions seraient très précises, ce qui permettrait de mesurer les caractéristiques du boson de Higgs. Cette phase durerait une quinzaine d'années. Dans la seconde moitié du siècle, la phase dite FCC-hh, pour hadron-hadron, prendrait le relais. Des protons y collisionneraient avec leurs particules d'antimatière, les antiprotons. Le tunnel serait le même que celui du FCC-ee, mais les instruments et une grande partie de la machine devraient être renouvelés pour permettre cette évolution des expériences. Le passage aux protons, plus lourds, permettrait une montée en énergie encore supérieure à celle de la phase précédente. L'observation d'un nouveau domaine des hautes énergies devrait alors s'ouvrir avec peut-être des découvertes et des phénomènes inconnus.

Si les enjeux du FCC sont scientifiques, il ne faut pas perdre de vue ses aspects géopolitiques. Alors que la note de l'Office de 2019 mentionnait de nombreux autres projets équivalents, le FCC est désormais l'un des seuls en lice, avec le projet de collisionneur chinois. Celui-ci ressemble en tout point au FCC, par la taille comme par les objectifs. La crainte d'être dépassé par ce collisionneur et de se trouver devant une page blanche en 2040 est un des motifs d'inquiétude majeur mentionnés par Fabiola Gianotti, directrice générale du CERN. Nous l'avons ressenti dans les échanges avec les équipes que nous avons rencontrées lors de notre visite. Certes, le CERN a pu bâtir son complexe d'accélérateurs et son expertise sur le long terme, alors que les Chinois partent de zéro, mais ils sont capables d'avancer très vite. La question est donc de savoir si les valeurs de coopération scientifique et de science ouverte promues par le CERN seront en mesure de maintenir une certaine influence de la recherche européenne en physique des particules.

Mme Anne-Catherine Loisier, sénatrice, rapporteure, vice-présidente de l'Office. – Le projet de futur collisionneur circulaire est porté par le CERN, l'organisation chargée de l'étude du projet par la stratégie européenne de physique des particules. C'est dans ce cadre que le CERN a rendu les conclusions de l'étude de faisabilité au début de cette

année. Cette étude en trois volets est exhaustive. Elle traite à la fois des aspects scientifiques, techniques, environnementaux et locaux du projet. Seul son volume III a été traduit de l'anglais.

La communauté des physiciens des particules doit se fonder sur les résultats de cette étude pour apprécier l'intérêt de l'ensemble du projet ; cette appréciation sera incluse dans la nouvelle stratégie européenne de physique des particules dont les conclusions sont attendues pour 2026. Le Conseil du CERN, organe décisionnaire de l'organisation, dans lequel chaque pays membre est représenté, prendra une décision finale en 2028.

Le coût de la première phase du projet, incluant la construction du tunnel et les différents coûts associés, est estimé à 15 milliards de francs suisses. Les expériences suivantes seraient financées par les collaborations internationales. Le CERN en prendrait en charge 10 %, les États membres du CERN devant être sollicités dans le cadre de leur contribution annuelle augmentée d'une dizaine de pour cent. Des États observateurs très impliqués comme le Japon ou les États-Unis seraient également sollicités. L'Union européenne pourrait être mobilisée sur ce financement. À l'heure actuelle, chaque pays membre participe au financement du CERN au prorata de son PIB. Pour la France, cela correspond à un montant de 166 millions d'euros par an. C'est la première ligne budgétaire au titre des très grandes infrastructures de recherche. Au vu de la contrainte budgétaire que le CERN fait peser en termes absolus mais aussi au regard des autres infrastructures de recherche moins dotées, il est essentiel qu'il justifie l'augmentation du budget qu'entraînerait la construction du FCC.

L'un des buts de nos auditions était de comprendre comment la décision et les arbitrages entre projets de recherche requérant une expertise avancée étaient pris au sein de l'État. Il existe plusieurs catégories d'infrastructures de recherche. Certaines sont gérées directement par des organismes tels que le CEA et le CNRS, d'autres sont à la main du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche. Enfin, les organisations internationales comme le CERN sont régies par des traités internationaux.

Afin de préparer la décision de la France au conseil du CERN, la direction générale de la recherche et de l'innovation pilote un comité interministériel qui regroupe le ministère des Affaires étrangères et la préfecture de la région Auvergne-Rhône-Alpes, ainsi que des experts et des représentants du CNRS et du CEA pour instruire le dossier de façon complète. La présence de l'expertise au sein de la décision publique est importante, compte tenu de la complexité technique du sujet, de son caractère fondamental et de la difficulté d'évaluer les retombées scientifiques de ce projet.

Mme Dominique Voynet, députée, rapporteure. – Comme pour tout projet d'infrastructure d'ampleur, en particulier au regard de ses impacts environnementaux, le projet de FCC fera l'objet d'un débat public en France, qui se tiendra, à partir de 2026, à l'échelle nationale et à l'échelle locale et sera coordonné par la commission nationale du débat public.

Lors de notre déplacement dans l'Ain et en Haute-Savoie, nous avons rencontré de nombreux élus locaux, en particulier des maires et des présidents de communautés de communes. Nous avons assisté à une réunion entre la préfecture de région et ces élus locaux. Nous avons rencontré bien des parties prenantes associatives ou scientifiques. Nous avons été surprises de constater que dans l'esprit de nos interlocuteurs, le projet semblait déjà ficelé, et la commission nationale du débat public le note elle-même dans l'étude de contexte préalable

à sa saisine, en 2026. Ce n'est pourtant pas le cas. Aucune décision n'a été prise, le projet n'étant encore qu'en phase d'instruction.

Cela illustre bien le besoin crucial d'information du public, des élus, des associations, à plusieurs niveaux : sur le programme du débat public, sur les impacts locaux, sur les retours économiques directs et indirects du projet, mais aussi sur sa pertinence scientifique. L'étude de faisabilité reste d'ailleurs difficile d'accès, non seulement parce qu'elle n'est pas traduite mais aussi parce qu'elle est peu disponible, comme nous l'avons constaté lors de la réunion à la préfecture de région. La présente note a aussi l'ambition de contribuer à la transparence sur le projet de FCC.

Mme Anne-Catherine Loisier, sénatrice, rapporteure, vice-présidente de l'Office. – Au-delà des sujets stratégiques de recherche fondamentale et de leadership scientifique mondial, le FCC est un projet de très grande infrastructure qui pose des questions d'impact local. Il serait construit à la frontière franco-suisse, dans la même région que le LHC. L'emplacement précis, optimisé dans l'étude de faisabilité, est quasiment fixé. Il traverse l'Ain et la Haute-Savoie, avant de passer sous le lac Léman, le tout dans un anneau de 91 kilomètres de circonférence à 240 mètres de profondeur en moyenne.

Le CERN est un acteur incontournable de ce territoire. Il participe à la prospérité économique et au rayonnement international de la région, notamment dans l'Ain. En Haute-Savoie, le sujet est un peu différent. Le CERN affirme procurer à la France un retour économique positif, même si, lors des échanges avec des élus, cela a fait l'objet de débat, qu'il soit direct, par l'achat d'électricité, ou indirect par le renforcement de l'attractivité économique locale.

Ce projet suscite néanmoins des inquiétudes, qu'il s'agisse du chantier qui doit durer une dizaine d'années ou, paradoxalement, de l'arrivée de nouveaux emplois de nature à agraver la pression sur les transports et les infrastructures d'une région déjà saturée. L'emprise en surface du collisionneur devrait être relativement faible, de l'ordre de 40 hectares. Les déblais à extraire sont estimés entre le tiers et la moitié de ceux du tunnel de la ligne Lyon-Turin, dans la même région. Leurs modalités d'extraction et de stockage, pas encore arrêtées, suscitent le plus d'inquiétude.

Les impacts environnementaux du projet de FCC ont été au cœur du débat public au niveau local. Nous avons d'ailleurs rencontré un collectif créé sur place. Au niveau national, des tribunes de scientifiques ont été publiées, notamment dans le journal *Libération*.

Un des principaux enjeux est la consommation énergétique du futur collisionneur, estimée entre 1,1 et 1,8 térawattheure par an, soit deux à trois fois celle du LHC actuel. Le CERN assure faire des efforts pour optimiser la consommation électrique et récupérer la chaleur fatale, ce qui est déjà le cas des collisionneurs actuels. Cette consommation, équivalente à celle d'une ville de 200 000 habitants, pose la question de la soutenabilité du projet, qui doit fonctionner tout au long de la seconde moitié du siècle. Il ressort de nos auditions et de nos déplacements que le CERN ne semble pas avoir pris la pleine mesure des inquiétudes à ce sujet.

La ressource en eau fait l'objet de questionnements, en particulier à cause de la traversée, sur une portion du tunnel, de zones karstiques, qui risquerait d'affecter la circulation des eaux souterraines.

Selon nous, le projet ne semble pas suffisamment prendre en compte les éléments d'impact environnemental et d'adaptation au changement climatique, essentiels compte tenu de la durée de vie de l'équipement.

Alors que le CERN a engagé tardivement le processus d'information du public, il nous semble nécessaire de mieux l'informer en amont du débat de 2026, afin de permettre une véritable compréhension des enjeux multiples et une appropriation des conséquences sur le quotidien de la population.

La pertinence scientifique du projet, mais aussi son intégration territoriale et les réponses du CERN aux questions environnementales, sont des éléments essentiels de la discussion, aujourd'hui trop peu exposés. L'acceptabilité du projet conditionnera sa réalisation, compte tenu de son importance et de son impact sur ce territoire. L'information effective et efficace de l'ensemble des parties prenantes est déterminante.

M. Patrick Chaize, sénateur. – Je porte un regard bienveillant sur ce projet, dans la mesure où les élus de l'Ain sont accoutumés à la présence du CERN sur leur territoire. Ils savent quelles sont les retombées économiques de cette institution pour notre département. La question fondamentale, c'est l'intérêt scientifique et la pertinence du bilan économique de la construction de cet ouvrage. Sur ces sujets, nous attendons des réponses.

M. Arnaud Saint-Martin, député. – Ce projet, le plus important en physique des hautes énergies, est très impactant à tous les niveaux que vous avez évoqués. Il pose de multiples questions, ne serait-ce que sur le plan scientifique. Les physiciens eux-mêmes se demandent dans quelle mesure ils vont encore pouvoir faire des découvertes.

Que deviendra le LHC après la construction éventuelle de ce très grand collisionneur ? Servira-t-il à des étudiants ? Continuera-t-on à en faire un usage scientifique ? Quel avenir pour cette infrastructure qui a coûté très cher et a produit des découvertes fondamentales ?

Vous avez évoqué des interrogations de la part de riverains et d'associations environnementales. Certaines m'ont sollicité. J'étais embarrassé pour répondre, car partagé entre l'intérêt scientifique et les interrogations d'ordre environnemental. Certains scientifiques se mobilisent contre ce projet. Ils l'ont fait savoir dans une tribune publiée dans *Libération*. Le pari heuristique de découverte de potentielles nouvelles structures élémentaires de la matière est éminemment hypothétique. Vous avez auditionné un membre du collectif Scientifiques en rébellion, spécialisé en sciences de la Terre. Même des physiciens utilisateurs d'accélérateurs critiquent le projet. Quels sont leurs arguments scientifiques et dans quelle mesure est-ce de nature à remettre en cause le projet ?

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l'Office. – De l'aveu même de la directrice du projet, si, avec le LHC, il y avait une forte présomption de détecter le boson de Higgs, ici, on ne sait pas ce qu'on cherche, ni même si on va trouver quelque chose.

On dit que le projet chinois ressemble en tout point à celui du CERN, et pour cause. Il y a une forte suspicion de copiage massif des données du prototype du CERN. Doit-on laisser faire les Chinois, au risque de négliger une recherche scientifique fondamentale ? C'est un sujet de souveraineté. S'ils font une découverte fondamentale pour l'ensemble de la physique, nous serons passés à côté.

M. David Ros, sénateur, vice-président de l'Office. – À la fin du XIX^e siècle, de nombreux physiciens doutaient de la possibilité d'une physique quantique. Par définition, on ne connaît pas à l'avance les résultats d'une recherche. Le débat porte plutôt sur le montant à investir au regard d'autres sujets pour lesquels il existe des attentes fortes.

Le LHC continuerait à fonctionner et il servirait à une calibration du nouveau FCC, mais se posera ensuite la question de son démantèlement, au regard d'exigences environnementales.

Mme Dominique Voynet, députée, rapporteure. – Tout au long de notre travail, nous avons rencontré le sujet de l'arbitrage entre ce projet de recherche et d'autres moins reconnus socialement, politiquement, par la communauté scientifique, par le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche et par les institutions internationales. On nous a dit que les physiciens des particules obtenaient plus facilement des prix Nobel que des chercheurs dans le domaine de la santé ou du climat. L'arbitrage politique à opérer entre différents projets ne relève pas de cette note mais en est évidemment une question sous-jacente.

Le programme d'expériences du LHC devrait se poursuivre jusqu'en 2040, date à laquelle son activité devrait s'interrompre, conduisant au démantèlement de ses installations. Néanmoins, les équipements du tunnel seront en partie réutilisés dans les expériences suivantes. Ils sont d'ailleurs produits dans une perspective internationale et incluent par exemple des pièces fabriquées au Japon ou aux États-Unis.

Nous avons rencontré des scientifiques hostiles au projet, non à cause d'une volonté d'arrêter la recherche sur le sujet, mais au motif d'une responsabilité civique face au changement climatique et aux enjeux environnementaux tels que les déblais et l'eau, et au vu des orientations à donner à la recherche. Un tel projet peut-il être la priorité de l'humanité, dans un contexte de rareté financière et de questionnement sur le progrès de l'humanité ?

Concernant le projet chinois, nos interlocuteurs ne nous ont pas caché leur inquiétude de la concurrence faite au modèle scientifique du CERN, ouvert et coopératif, par un projet chinois fermé à l'avenir et dont on pourrait imaginer, à l'horizon de trente ou quarante ans, qu'il inclue de potentielles implications militaires. La défense du modèle de science ouverte du CERN est un argument fort en faveur du FCC, et cela relève d'un débat civique.

Nous avons noté dans l'Ain une bonne compréhension de ce qu'est le CERN, alors que les réticences sont beaucoup plus fortes en Haute-Savoie. Mais nous avons noté des deux côtés une irritation croissante contre l'asymétrie des conditions entre la Suisse et la France. Côté suisse, la réglementation environnementale est très stricte, on refuse de construire les logements et les écoles qui incombent alors à la partie française ; de plus, le cadre fiscal et financier est totalement incompréhensible pour les acteurs.

Mme Anne-Catherine Loisier, sénatrice, rapporteure, vice-présidente de l'Office. – Les élus expriment des inquiétudes quant à leur capacité de financer tous les équipements nécessaires à un afflux d'activités et d'acteurs et ils ne se sentent pas soutenus par le dispositif actuel.

Les arbitrages comportent un volet scientifique – que laisserons-nous de côté en ne choisissant pas le FCC ? – et un volet climatique. Je signale les enjeux d'acceptabilité. Dans nos sociétés, des réactions sur un territoire peuvent remettre en cause un projet. Le CERN ne semble pas avoir mesuré l'importance des réactions aux impacts climatique et locaux.

Les chercheurs veulent caractériser le boson de Higgs. Il est aujourd’hui difficile de savoir ce qu’on va en faire tant qu’on n’a pas réussi à le caractériser. Cela s’inscrit dans la trajectoire habituelle d’une recherche de ce niveau. En l’occurrence, on découvre ces particules et petit à petit, on approfondit nos connaissances. Derrière le boson de Higgs, cela ouvre potentiellement des découvertes.

C’est un secteur où visiblement l’Europe, le CERN et ses partenaires ont un leadership. Y a-t-il aujourd’hui beaucoup de secteurs dans lesquels nous avons un leadership ? Devons-nous le laisser aux Chinois ?

M. David Ros, sénateur, vice-président de l’Office. – La communauté scientifique russe était très active au CERN. Avec le projet chinois, il y a un doute sur où vont se situer les Russes.

M. Daniel Salmon, sénateur. – J’ai visité le réacteur thermonucléaire expérimental international (ITER). On sait à peu près ce que l’on veut y trouver et comment ; les projets sont de moyen terme, mais il existe une similitude entre les deux équipements. Je comprends l’intérêt des physiciens à s’engager dans ces projets gigantesques qui font rêver. On entre dans des dimensions qui ne sont plus les nôtres au quotidien.

Il faut se réjouir du multilatéralisme scientifique d’un tel projet à un moment où le monde est fracturé. Sur ces sujets, nous réussissons encore à travailler avec nos ennemis préférés. La note n’indique toutefois pas clairement les pays impliqués. Pour reprendre l’exemple d’ITER, la collaboration inclut non seulement les Américains, mais aussi les Russes, les Chinois, les Coréens, etc.

En termes d’acceptabilité, d’appropriation, d’enjeux environnementaux, la réalisation de tunnels de ce gabarit dans des zones où le cycle de l’eau peut être altéré interroge. La consommation de 3 millions de mètres cubes d’eau par an est loin d’être négligeable.

À un moment où l’argent est rare, on doit s’interroger sur les priorités de la recherche. Quels sont les domaines les plus pertinents à financer ? Ces débats restent un peu éloignés des citoyens.

Concernant la compétition internationale, si nous renonçons au projet, d’autres vont-ils faire des découvertes fondamentales ?

M. Stéphane Piednoir, sénateur, président de l’Office. – Les recherches sur l’infiniment petit sont vertigineuses, car elles ouvrent des interprétations sur l’infiniment grand. Elles laissent entrevoir des abysses de connaissances qui donnent tout leur sens à la coopération internationale. Ce projet n’aurait pas une incidence substantielle sur le budget européen. Fabiola Gianotti, directrice générale du CERN, rencontrée dans un autre cadre, me disait que l’effort budgétaire à consentir par l’Union européenne était minime.

Mme Dominique Voynet, députée, rapporteure. – En conclusion, ce projet doit être présenté et expliqué à la population. Or je suis frappée de constater que le CERN ne semble pas conscient de cette réalité, comme si l'euphorie scientifique devait suffire. Parvenue en fin de mandat, Fabiola Gianotti doit être remplacée par un Britannique réputé plus attentif aux attentes de la société et à la qualité du débat public. Que le CERN n'ait même pas jugé nécessaire de traduire en français l'ensemble de l'étude de faisabilité, alors qu'une grande partie de l'infrastructure se trouverait sous le territoire français et aura une incidence sur la vie des populations de l'Ain et de la Haute-Savoie, illustre cette méconnaissance. La commission nationale du débat public, les garants choisis pour accompagner le CERN dans cette première phase de discussion ont insisté sur ce point. Nos interlocuteurs du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche nous ont assuré que la décision n'était pas prise et que d'autres projets importants devaient être discutés.

Monsieur le président, il serait utile, dans un domaine où nous aurons peut-être notre rôle à jouer, que l'OPECST organise une discussion sur les grands projets liés à la recherche. Celui-ci est le plus important, soutenu par une communauté soudée, mais l'ensemble des projets mériterait de faire l'objet d'une discussion.

Mme Anne-Catherine Loisier, sénatrice, rapporteure, vice-présidente de l'Office. – Nous devons être attentifs aux arbitrages sociétaux. Nous avons rendez-vous avec l'histoire, la science et la recherche. Un débat doit avoir lieu avec la société civile et le monde scientifique, parce que nous devrons prendre des décisions déterminantes pour l'avenir de l'Europe et de l'Occident. En dépit de sa complexité, ce sujet important mérite d'être porté à la connaissance du grand public afin que chacun prenne conscience de ses enjeux.

La note scientifique sur le projet de « futur collisionneur circulaire » (FCC) du CERN est adoptée à l'unanimité.

La réunion s'achève à 11 h 15.

Membres présents ou excusés

Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

Réunion du jeudi 16 octobre 2025 à 9 h 30

Députés

Présents. - M. Maxime Laisney, M. Gérard Leseul, M. Arnaud Saint-Martin, Mme Dominique Voynet

Excusés. - M. Jean-Luc Fugit, M. Pierre Henriet

Sénateurs

Présents. - M. Patrick Chaize, Mme Anne-Catherine Loisier, Mme Corinne Narassiguin, M. Stéphane Piednoir, M. David Ros, M. Daniel Salmon

Excusés. - M. Arnaud Bazin, Mme Martine Berthet, M. André Guiol